

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

**Náhrada litého rotorového vinutí asynchronního
elektromotoru montovanou kotvou.**

**Exchange of Molten Squirrel Cage Rotor on Induction Motor
Behind Prefab Type Winding.**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Filip Pavlíček**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: Náhrada litého rotorového vinutí asynchronního elektromotoru
montovanou kotvou.
Exchange of Molten Squirrel Cage Rotor on Induction Motor Behind
Prefab Type Winding.
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Motory s kotvou nakrátko, obecná teorie.
Srovnání vlastností litých a montovaných kotev.
Návrh náhrady lité kotvy montovanou kotvou u konkrétního stroje.
Vytvoření MKP modelu rekonstruovaného stroje.
Vyhodnocení výsledků.


Seznam doporučené odborné literatury:

Hrabovcová, V. a kol.: Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilinská univerzita, 2014
Chmelík, K., Pospíšilík, J.: Elektrické stroje v energetice, VŠB Ostrava, 2003
Petrov, G.N.: El. stroje 1 a 2, ACADEMIA 1980
Kopylov, I.V.: Stavba elektrických strojů, SNITL Praha, 1988
Další dle pokynů vedoucího diplomové práce.

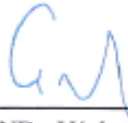
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015
Datum odevzdání: 29.04.2016


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 26. dubna 2016



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Bernatovi, Ph.D., Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Dudovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je udělat vyhodnocení původního asynchronního elektromotoru s litým rotorovým vinutím a nového asynchronního elektromotoru s montovanou kotvou. Určit zda se změní elektrické parametry stroje, popřípadě jak se změní. Určit, zda motor bude provozuschopný, zda počáteční návrh firmy Hansen Electric spol. s.r.o. je správný, zda jsou správně navrženy materiály klece, tvar drážky nebo bude potřeba vyrobit dvojitou klec.

Klíčová slova

Asynchronní motor, elektromotor, klec, kotva, vinutí, odpor, napětí, proud, izolace, stator, rotor, drážka, magnetický obvod, momentová charakteristika, rozběhový proud, materiál, plechy, magnetická indukce

Abstract

The aim of this thesis is to do a full evaluation of the asynchronous motor with cast rotor windings and a new asynchronous motor with mounted anchor. Determine whether to change the electrical parameters of the machine, or how they change. Determine whether the engine will be operational if the initial design firm Hansen Electric spol. Ltd. is correct, whether they are properly designed cage materials, shape or grooves will produce a double cage.

Keywords

Induction motor, electric motor, cage, anchor, winding resistance, voltage, current, insulation, stator, rotor slot, magnetic circuit, torque characteristics, starting current, sheet metal, magnetic induction

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	8
Seznam ilustrací	9
Seznam tabulek.....	10
1 Úvod	11
2 Asynchronní motor.....	12
2.1.1 Magnetický obvod.....	13
2.1.2 Elektrický obvod	13
2.1.3 Izolace	14
2.1.4 Mechanické části.....	14
2.2 Základní uspořádání	15
2.2.1 Stator	15
2.2.1 Rotor.....	15
2.3 Princip funkce.....	17
2.4 Dahlanderovo zapojení Δ/YY	17
3 Náhrada litého rotorového vinutí montovanou kotvou	18
3.1 Srovnání vlastností litých a montovaných kotev.....	19
3.1.1 Lité rotorové klece	19
3.1.2 Montované rotorové klece	22
4 Analytický návrh motoru	25
4.1 Parametry motoru.....	25
4.2 Rozměry motoru	26
4.3 Parametry magnetického obvodu.....	28
4.4 Volba hlavních rozměrů a návrh statorového vinutí	30
4.4.1 Výpočet rozměrů drážek a zubů statoru	38
4.1 Volba vzduchové mezery	44
4.2 Výpočet rotoru nakrátko	45
4.2.1 Výpočet drážek rotoru	49
4.3 Výpočet magnetického obvodu.....	52
4.1 Velikost magnetického napětí	53
4.2 Výpočet odporu a reaktancí	56
4.3 Ztráty.....	64
4.4 Momentová charakteristika	69
5 MKP – metoda konečných prvků	70

5.1	Numerický výpočet	71
6	Výsledky výpočtů.....	73
6.1	Zapojení do Δ , $2p = 8$	73
6.2	Zapojení do YY, $2p = 4$	75
6.3	Rozložení magnetické indukce ve statoru a rotoru	77
6.4	Charakteristiky původního elektromotoru	79
7	Závěr.....	87

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	A/m	lineární hustota proudu
B	T	magnetická indukce
D	mm	vnitřní průměr statoru
D_e	mm	vnější průměr statoru
D₂	mm	průměr rotoru
D_h	mm	průměr hřídele
H_z	A/m	magnetické napětí zubů
I₁	A	proud statoru
I₂	A	proud rotoru
J	A/m	proudová hustota
L	H	indukčnost
M	Nm	moment
N	-	počet závitů
P	W	výkon
Q₁	-	počet drážek statoru
Q₂	-	počet drážek rotoru
R	Ω	odpor
S_{ef}	m ²	průřez vodiče
S_t	m ²	průřez tyče
U	V	napětí
V_d	-	počet efektivních vodičů
X	Ω	reaktance
Z	Ω	impedance
φ	Wb	magnetický tok
2p	-	počet pólů stroje
a	-	počet paralelních vinutí
b	m	šířka
h	m	výška
k	-	činitel
l	m	délka
m	kg	hmotnost
n	Ot/min	otáčky
p	-	počet pólů
q	-	počet drážek na pól a fázi
s	-	skluz
t	-	drážková rozteč
θ	-	činitel kroku vinutí
δ	m	velikost vzduchové mezery
Δ	-	zapojení do trojúhelníku
cosφ	-	účinník
ρ	Ω/m	měrný tepelný odpor
ω	rad/s	úhlová rychlost
η	-	účinnost

Seznam ilustrací

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
2.1	Asynchronní motor	12
2.2	Stator	15
2.3	Rotor	16
3.1	Ruský stroj poháněný elektromotorem	18
3.2	Řez hliníkovým rotorem	19
3.3	Lité rotorové vinutí	19
3.4	Kruh nakrátko	20
3.5	Ventilační lopatky litého rotorového vinutí	20
3.6	Rotorové vinutí odlité z mědi	21
3.7	Detail kotvy	23
3.8	Montovaná rotorová kotva	23
4.1	Rozměry motoru, pohled z boku	26
4.2	Rozměry motoru, pohled ze předu	27
4.3	Hodnoty činitele K_E	31
4.4	Lineární hustota proudu a indikce ve vzduchové mezeře	32
4.5	Drážkové rozteče statoru	33
4.6	Střední hodnoty součinu A, J	36
4.7	Statorová drážka	40
4.8	Činitel uvažující vliv magnetizačního proudu v závislosti na $\cos\varphi$	47
4.9	Drážka obdélníkového průřezu	49
4.10	Činitel Δ_z v závislosti na b_0/t_{d1}	59
4.11	Činitel k_y' v závislosti na t_{d2}/t_{d1}	60
4.12	Drážka statoru typu S	61
4.13	Drážka rotoru	62
4.14	Činitel β_0 k výpočtu povrchových ztrát	65
5.1	Sít při rozložení celku do určitého počtu konečných prvků	70
5.2	Řez 3D modelem motoru	71
5.3	3D model motoru	72
6.1	Momentová charakteristika vyjádřena různými metodami výpočtů pro $2p = 8$	74
6.2	Rozběhový proud vyjádřený různými metodami výpočtů pro $2p = 8$	74
6.3	Momentová charakteristika vyjádřena různými metodami výpočtů pro $2p = 4$	76
6.4	Rozběhový proud vyjádřený různými metodami výpočtů pro $2p = 4$	76
6.5	Rozložení magnetické indukce motoru s montovanou kotvou pro $2p = 8$	77
6.6	Rozložení magnetické indukce motoru s litým rotorovým vinutím pro $2p = 8$	77
6.7	Rozložení magnetické indukce motoru s montovanou kotvou pro $2p = 4$	78
6.8	Rozložení magnetické indukce motoru s litým rotorovým vinutím pro $2p = 8$	78

6.9	Předpokládané charakteristiky původního motoru	79
------------	---	-----------

Seznam tabulek

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
4.1	Štítkové hodnoty nového a původního motoru	25
4.2	Informace o statoru	28
4.3	Informace o litém rotoru	29
4.4	Informace o motorovém rotoru	29
4.5	Osové výšky elektrických strojů a jim odpovídající velikosti statorových plechů	30
4.6	K_D podle počtu pólů	30
4.7	Dovolení hodnoty magnetické indukce B	38
4.8	Doporučené izolace plechů a činitele plnění železa	39
4.9	Porovnání vypočtených rozměrů statorové drážky se skutečnými	42
4.10	Zvětšení drážek o přídávkem na skládání	42
4.11	Činitel pro k_h výpočet průměru hřídele	45
4.12	Doporučené počty drážek rotoru Q_2 při známém počtu drážek rotoru Q_1	46 47
4.13	Porovnání vypočtených rozměrů drážek rotoru se skutečnými	50
4.14	Ztráty v plechu	54
4.15	Činitelé pro výpočet čel vyspávaného obvodu	56
5.1	Získané hodnoty momentů a proudů numerickou metodou	72
6.1	Výsledky z jednotlivých výpočtových metod pro $2p = 8$	73
6.2	Výsledky z jednotlivých výpočtových metod pro $2p = 4$	75

1 Úvod

Tato diplomová práce je na téma z praxe pro firmu Hansen Electric spol. s.r.o.

Firma Hansen Electric spol. s.r.o. zajišťuje vývoj, konstrukci, výrobu, instalaci a servis elektrických zařízení s krytím IP 68 určených do prostředí s nebezpečím výbuchu.

V ruských solných dolech se používají velká dopravní zařízení sloužící pro přepravu vytěženého materiálu z místa A do místa B. Tato zařízení pohání asynchronní elektromotory s litým rotorovým vinutím. Tyto elektromotory pracují v přerušovaném chodu pracovního zatížení, režimu S4 a S6.

Protože se těmto elektromotorům blíží jejich konec doby životnosti, je potřeba udělat patřičná opatření. Nejprve se myslelo, že postačí vyměnit pouze rotor odlitý z hliníku za nový rotor s montovanou kotvou. Když se motor demontoval ze stroje a rozebral, zjistilo se, že motor je značně opotřebován a jeho materiály jsou již degradovány teplem a stářím natolik, že se nevyplatí motory opravovat, ale bude lepší rovnou vyrobit nové. Nejjednodušší a nejlepší variantou, co se týče návrhu a dodržení požadovaných vlastností stroje, by bylo vyrobit úplně stejný elektromotor. Co se týče ceny a výroby elektromotoru, je vzhledem k velikosti firmy Hansen Electric spol. s.r.o. a vzhledem k velikosti zakázky, kdy je potřeba vyrobit pár elektromotorů ročně, nejlepší variantou vyrobit nové motory s montovanou kotvou. Protože výroba elektromotoru s litou rotorovou kotvou by byla příliš nákladná. Z toho důvodu se nebude vyrábět zcela stejný elektromotor, ale vyrobí se nový elektromotor s montovanou kotvou o stávajících rozměrech, tak aby se mohl napasovat na místo původního elektromotoru. Zároveň bude mít podobné elektrické parametry tak, aby motor zvládal utáhnout stejnou zátěž.

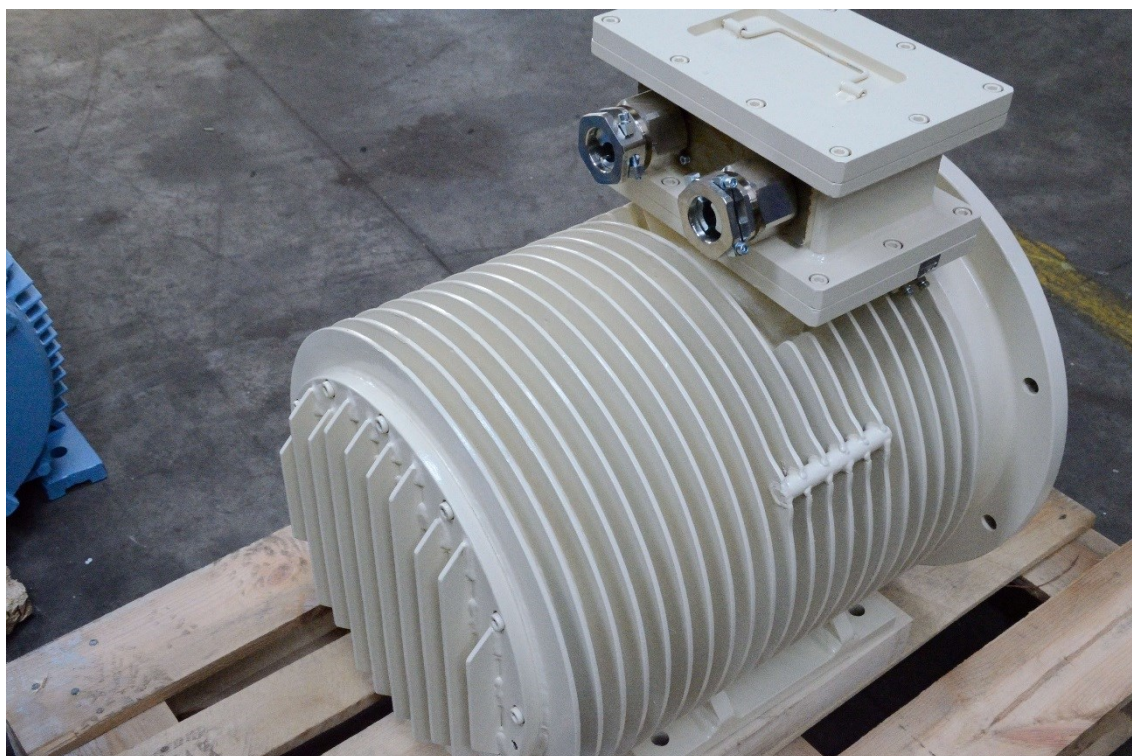
Cílem této diplomové práce je proto vyhodnotit, jak se změní parametry nového asynchronního elektromotoru s montovanou kotvou oproti původnímu asynchronnímu elektromotoru s litým rotorovým vinutím. Určit, zda se změní elektrické parametry stroje, popřípadě jak se změní, zda motor bude provozuschopný a jestli je počáteční návrh firmy Hansen Electric spol. s.r.o. správný. Bude se ověřovat, jestli navržené materiály klece a tvar drážky je zvolen správně, nebo bude potřeba motor vyrobit jinak.

2 Asynchronní motor

Asynchronní motor je zařízení, které přeměňuje elektrickou energii na energii kinetickou.

Asynchronní motor je nejrozšířenější elektrický stroj. Využívá se hlavně pro svou jednoduchost, spolehlivost, nenáročnost na údržbu, nízkou pořizovací cenu a poměr hmotnost/výkon. Mezi nevýhody asynchronního motoru patří zejména odběr jalové energie z napájecí sítě, která je nezbytná pro vybuzení magnetického pole pro svou činnost. Dalšími nevýhodami jsou velký proudový ráz, který vyvolává úbytek napětí v síti a obtížná regulace otáček. Tyto nevýhody jsou díky polovodičové technice již minulostí. Z těchto důvodů začaly asynchronní motory nahrazovat stejnosměrné motory. Díky polovodičové technice jako je frekvenční měnič, lze snadno měnit frekvenci a tím rozbíhat motor, regulovat jeho otáčky a omezit tak proudový ráz a s ním vyvolaný úbytek napětí. S touto polovodičovou technikou vznikají vyšší harmonické, které jsou nežádoucí, ale těmito problémy se v této publikaci nebudeme dále zabývat. [1] [2] [3]

Asynchronní motor se využívá pro pohon nejrůznějších zařízení, jako jsou například čerpadla, výtahy, ventilátory, jeřáby, stavební stroje, kompresory, pohony dopravních prostředků a další. [2] [3]



Obr. 2.1: *Asynchronní motor*

Asynchronní motor se skládá z magnetického obvodu, elektrického obvodu a mechanických částí.

2.1.1 Magnetický obvod

Magnetickým obvodem je ta část motoru, která slouží k přenosu magnetické energie. Magnetický obvod je tvořen státorem, rotorem a vzduchovou mezerou mezi nimi.

Magnetickým obvodem se uzavírá ve vymezeném prostoru časově proměnný magnetický tok potřebný ke změně energie elektromagnetickou indukcí. Magnetický tok, který se uzavírá mimo magnetický obvod a neúčastní se tak přeměny energie, se nazývá rozptylový magnetický tok. Tento rozptylový magnetický tok snižuje účinnost stroje. [2] [3]

U motoru používáme izolované dynamové plechy, což jsou neorientované železné plechy určeny pro elektrotechniku, které jsou legované 3-5% křemíku. Tyto plechy jsou jednotlivě mezi sebou izolovány vrstvou oxidací, fosfatizací, lakováním nebo papírem nasáklého olejem. Těmito řezy rozdělujeme magnetický obvod v rovině kolmé ke směru magnetické indukce na malé plochy pro zvětšení ohmického odporu magnetického materiálu a snižujeme tak nepříznivé účinky vířivých proudů. Legováním železa křemíkem se zvyšuje měrný odpor železa, tím se omezují ztráty vířivými proudy v železe a také se zlepšuje BH charakteristika. U BH charakteristiky dochází ke zmenšení plochy magnetizační křivky, se kterou klesají hysterezní ztráty odpovídající energii spotřebované při přemagnetování. Křemík ale způsobuje tvrdnutí a křehnutí plechů, to pak ztěžuje jejich zpracování, proto se užívá v omezené míře. Ztráty vířivými proudy dále omezujeme válcováním plechů za studena, což se provádí pod Curieho teplotou. Nad Curieho teplotou ztrácí látky své feromagnetické vlastnosti. Pro železo je tato teplota stanovena na 768°C. Tloušťka těchto plechů bývá od 0,5 mm až po 1 mm, přičemž s tenčími plechy klesají ztráty v železe a roste účinnost stroje, ale také rostou rozměry stroje, protože každý plech musí být odizolován vrstvou izolace. Do těchto plechů jsou vyraženy drážky pro vinutí. [2] [3] [4]

2.1.2 Elektrický obvod

Elektrickým obvodem je ta část motoru, která slouží pro přenos elektrické energie. Patří do něj elektrické vinutí statoru, rotoru a svorkovnice. Vinutí je tvořeno izolovanými i neizolovanými dráty, tyčemi a pásy. U této části obvodu se řídíme Ohmovým zákonem. Chceme, aby motor měl co nejmenší elektrické ztráty, a proto se snažíme, aby ohmický odpor elektrovedné části byl co nejmenší. Toho docílíme průřezem a správnou volbou materiálu. Proto

se využívají materiály o velké elektrické vodivosti jako je hliník, měď a její slitiny bronz a mosaz. Dalšího snížení ztrát podle Ohmova zákona dosáhneme zvýšením napětí, protože s rostoucím napětím za stálého výkonu klesá proud a s ním i elektrické ztráty. Tyto elektrické ztráty závislé na velikosti elektrického proudu a odporu vytvářejí teplo, které způsobuje nárůst elektrického odporu, degradaci izolace a stárnutí stroje. Toto přebytečné teplo, které je pro nás ztrátovou energií, je nutné odvádět do okolního prostředí. [2] [3]

2.1.3 Izolace

Aby stroj mohl pracovat po dlouhou dobu bez poruch, musí být zajištěná dostatečná elektrická pevnost izolace. Izolace vodičů se používá pro odizolování vinutí mezi jednotlivými závitů, od magnetického obvodu drážky a dalšími uzemněnými částmi magnetického obvodu a kostry. Životnost elektrického zařízení je dána životností izolace, která je cca 20 let. Trvanlivost materiálu izolace závisí na mnoha činitelích, jako jsou přechodné děje, teplota, elektrické namáhání přechodnými ději, tepelná roztažnost materiálu, chvění, otřesy a na vlivech prostředí jako jsou nečistoty, vlhkost, chemikálie a další. Jako izolace vodičů pro vinutí se používá smalt a skelné vlákno. Pro izolaci cívek se užívá slída, tkanina nebo vrstvený papír. Jako izolace drážek se používá slídový papír nebo fólie. [3] [6]

2.1.4 Mechanické části

Do mechanických částí řadíme kostru motoru, ložiska, ventilátor, těsnění a další. Na kostru stroje, hřídel a stahovací konstrukce se používá ocel nebo litina. Na kluzná ložiska se používají olověné bronzy.

Rozhodující vliv na provedení a izolaci elektrického zařízení má prostředí, ve kterém bude zařízení provozováno. Volí se způsob upevnění, chlazení a IP krytí, které slouží proti nebezpečnému dotyku osob a jako ochrana zařízení proti vniknutí cizích předmětů a vody.

Do prostoru s nebezpečím výbuchu musí být elektrické zařízení konstruováno jako nevýbušné. To znamená, že za předpokládaných provozních podmínek nemůže inicializovat výbušnou směs. [2] [3]

2.2 Základní uspořádání

2.2.1 Stator

Stator jako statická část stroje. Je to v podstatě dutý válec složený z elektrotechnických izolovaných plechů. Do těchto plechů jsou vyraženy drážky pro elektrické vinutí. Toto vinutí se skládá z cívek a cívky ze závitů. Konce vinutí jsou pak vyvedeny do svorkovnice, kde je přiváděno napětí. [3]



Obr. 2.2: *Stator*

2.2.1 Rotor

Rotor jako rotační část stroje je také složen z elektrotechnických izolovaných plechů umístěných na hřídeli, do nichž jsou vyraženy drážky pro vinutí, tak jako u statoru.

Rotor je rotační část motoru, která se otáčí v dutině statoru. Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera.

Podle rotorového vinutí máme motory s kotvou nakrátko nebo kotvou kroužkovou.

Motory s kotvou kroužkovou mají rotorové vinutí v podstatě stejné jako vinutí statoru. Vinutí je uloženo v drážkách a jeho vývody jsou připojeny ke kroužkům na hřídeli. Těmito rotory se dále v této publikaci nebudu zabývat.

Nejrozšířenějším elektrickým motorem je asynchronní motor s rotorovou kotvou nakrátko, který se vyrábí v nejrůznějších tvarových provedeních pro všestranné využití. Těmto rotorům se také někdy říká klecové vinutí, protože tyto rotory jsou provedeny z tyčí, které jsou uloženy v neizolovaných drážkách rotorových plechů a po obou stranách spojeny kruhy nakrátko tak, že tvoří klec ve tvaru válce. [3]

Malý odpor klecového vinutí dává motoru dobré vlastnosti při chodu, jako jsou malý skluz, vysoká účinnost, ale má také své nevýhody, jako je malý záběrný moment a velký záběrný rozběhový proud, který je až sedminásobkem jmenovitého proudu. [3]

Klecová vinutí lze konstruovat tak, aby využívaly povrchového jevu a při svém běhu v závislosti na skluzu měnily odpor a reaktanci. Povrchového jevu využívají vírové a dvojité klece. [6]



Obr. 2.3: *Rotor*

2.3 Princip funkce

Celý princip spočívá na elektromagnetické indukci, kde vodič protékaný proudem si vytváří kolem sebe vlastní elektromagnetické pole. Ve vodiči pohybujícím se v cizím magnetickém poli se indukují napětí, které vyvolává proud. Tato elektromagnetická pole jsou pak soustředěna do magneticky vodivých materiálů, jako jsou ferity. V těchto materiálech se pak uzavírá magnetický tok. Díky tomu je pak elektromagnetické pole lépe využito, neboť nedochází k takovému rozptylu. [2] [3]

Na svorky motoru je přiváděno 3f střídavé napětí, které v cívkách statoru vyvolá proudy, které vybudí elektromagnetické pole. Protože se jedná o 3f střídavou soustavu, kde jednotlivá napětí a proudy mezi fázemi jsou posunuta o 120° elektrických, vytváří se točivé elektromagnetické pole. Toto točivé elektromagnetické pole se soustřeďuje v magnetickém obvodu statoru a otáčí se synchronní rychlostí. Elektromagnetické pole se uzavírá v magnetickém obvodu statoru a magnetickém obvodu rotoru přes vzduchovou mezeru. [2] [3]

Díky točivému elektromagnetickému poli se ve vinutí rotoru indukují elektrické napětí, které vytváří elektrický proud. Elektrický proud vybudí elektromagnetické pole rotoru a rotor se začne otáčet. Rychlost otáčení nezátíženého rotoru se blíží k rychlosti otáčení elektromagnetického pole statoru, avšak nikdy této rychlosti nedosáhne kvůli mechanickým ztrátám, ztrátám v železe a rozptylovému magnetickému toku. Proto se rotor asynchronního stroje nebude nikdy otáčet synchronními otáčkami. Aby se však v rotoru indukovalo elektromagnetické pole a vinutím protékal elektrický proud, musí právě existovat relativní pohyb rotoru vzhledem k točivému poli statoru. Otáčky rotoru asynchronního motoru jsou tedy vždy nižší než otáčky synchronního pole. Tento malý pokles otáček, který je dále závislý na velikosti zatížení motoru, se udává jako skluz. [2] [3]

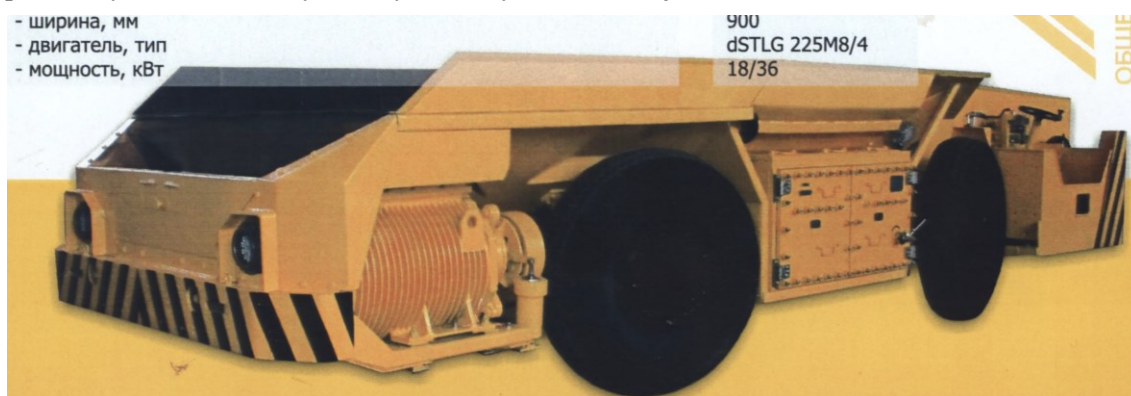
2.4 Dahlanderovo zapojení Δ/YY

Jedná se o motor s dělitelným vinutím statoru, sloužící ke změně počtu pólových dvojic motoru změnou zapojení statorového vinutí. Pomocí počtu pólových dvojic lze měnit rychlost otáček motoru a tím i záběrný moment a proud.

Při zapojení statorového vinutí do trojúhelníku jsou cívky zapojeny sériově, při zapojení do hvězdy dojde k paralelnímu seskupení cívek, čímž dojde ke snížení magnetické indukce v zubech statoru vlivem sníženého napětí, zdvojnásobí se otáčky a navýší výkon motoru. Jmenovitý točivý moment zůstává v obou zapojeních konstantní. [7]

3 Náhrada litého rotorového vinutí montovanou kotvou

Firma Hansen Electric spol. s r.o. se zabývá výrobou motoru pro stroje v ruských solných dolech. V těchto strojích se nachází staré asynchronní elektromotory s litým rotorovým vinutím, kterým se již krátí jejich doba životnosti. Tyto staré elektromotory budou postupně nahrazeny novými elektromotory o stejných rozměrech a podobných elektrických parametrech. To znamená, že na základě starých elektromotorů se vyrobí nové elektromotory o stejných rozměrech tak, aby tyto elektromotory bylo možné uložit místo původních. Zároveň je ale potřeba dodržet i elektrické parametry motoru tak, aby motory zvládaly utáhnout stejnou zátěž.



Obr. 3.1: Ruský stroj poháněný elektromotorem

Při výrobě nového elektromotoru se vychází z rozměrů původního motoru. Rozměry satorových plechů a satorových zubů zůstávají stejné společně i s počtem satorových drážek. Mění se však typ použitého materiálu. Nyní budou použity plechy z materiálu M470-50A místo původních plechů z nezjištěného materiálu. Do drážky bude uloženo měděné vinutí o průřezu drátu $1,25 \text{ mm}^2$. Rozměry rotoru zůstávají stejné i s počtem drážek. Změní se pouze tvar drážek a to z drážky typu V na obdélníkové. Také se změní materiál plechů, který bude rovněž z materiálu M470-50A.

Protože se jedná o menší firmu a také o menší zakázku, kde bude ročně vyrobeno pouze pár kusů těchto elektromotorů, nevyplatí se investovat do technologie pro výrobu litých rotorových klecí. Z toho důvodu jsou nové elektromotory vyráběny s montovanou kotvou z mosazných tyčí obdélníkového průřezu a měděných kruhů místo litého rotorového vinutí.

Změna elektrického odporu rotoru bude mít zásadní vliv na rozběhovou a momentovou charakteristiku motoru. Při použití vodivějšího materiálu vzroste záběrný proud při spouštění motoru a hrozí, že záběrný moment klesne natolik, až se dostane ke jmenovitému momentu nebo dokonce i pod něj. Díky tomu by se motor nerozběhl. Aby se momentová charakteristika motoru s montovanou kotvou co nejvíce podobala momentové charakteristice motoru s litým rotorem,

bude potřeba navrhnout nový tvar rotorové drážky a zvolit typ materiálu rotoru s podobným měrným odporem. Materiál musí být zároveň dobře opracovatelný tak, aby se dala kotva vyrobit.

3.1 Srovnání vlastností litých a montovaných kotev

3.1.1 Lité rotorové klece

3.1.1.1 Hliníkové klece

Tyto klece jsou vyráběny odléváním hliníku. Roztavený hliník je ve zvláštní kokile pod tlakem vstřikován do drážek magnetického obvodu rotoru sestaveného z neorientovaných dynamo plechů. Při odlívání vytlačuje hliník z kokily vzduch. Nikdy se však nepodaří vytlačit všechnu vzduch a v odlitku tak vznikají malé dutinky, které způsobují nehomogenitu materiálu a nepříznivě tak působí na elektrické i mechanické vlastnosti rotoru.



Obr. 3.2: Řez hliníkovým rotorem



Obr. 3.3: Lité rotorové vinutí

Výroba litých hliníkových rotorových klecí díky veškeré technologii, která je k tomu potřebná, se nevyplatí pro kusovou výrobu. Zato díky své jednoduchosti je vhodná pro sériovou výrobu.



Obr. 3.4: *Kruh nakrátko*

Tento odlitek, vyrobený z jednoho druhu materiálu, má takřka ve všech místech stejný odpor a vyznačuje se delší životností, protože je bez jakýchkoliv mechanických spojů na rozdíl od montovaných rotorových klecí. Kruhy nakrátko jsou u litých kotev v těsné blízkosti s dynamo plechy, což je dáno technologií výroby při odlévání a mívají odlity i ventilační lopatky, které pomáhají odvádět teplo vzniklé v rotoru do okolí.

Velkou výhodou je možnost návrhu libovolného tvaru drážky s ohledem na možnosti kvalitního odlití pro potřebné optimální vlastnosti rozběhových charakteristiky.



Obr. 3.5: *Ventilační lopatky litého rotorového vinutí*

3.1.1.2 Měděné klece

Pro ještě větší účinnost se rotory odlévají z mědi. Měděné rotory mají lepší elektrickou vodivost než hliníkové rotory a to až o 35%. Použitím mědi místo hliníku klesá odpor rotoru, se kterým roste záběrný proud a klesá záběrný moment motoru. Měď lze daleko lépe odlévat než hliník, proto při odlévání rotoru z mědi nevzniká v odlitku tolik vzduchových dutinek. Tyto dutinky pak mohou vést k nevyváženosti rotoru, které se projevují hlavně při vyšších rychlostech. Další výhodou měděných rotorů je velký moment setrvačnosti, který je způsoben vyšší hmotností rotoru. Měď má navíc oproti hliníku větší tepelnou vodivost. Díky tomu měděné rotory nepotřebují chladicí lopatky. Motor lze také častěji spínat a přetížít jej po delší dobu. [5]



Obr. 3.6: Rotorové vinutí odlité z mědi

Velkou nevýhodou měděných rotorů jsou vyšší pořizovací náklady. Ty jsou způsobeny dražší cenou materiálu vodiče a výrobními procesy. Po dosažení jejich životnosti je jejich zůstatková hodnota relativně vysoká, neboť lze snadno odloučit měď od železa a materiál tak znovu použít. [5]

Mezi další nevýhody patří také snížení záběrného momentu a nárůst rozběhového proudu.

Motor s měděným rotorem má také při jmenovitých otáčkách výrazně větší točivý moment než motor s hliníkovým rotorem. To vyžaduje vyšší mechanický výkon, který je úměrný vyššímu elektrickému příkonu. To znamená, že tyto motory s vyšší účinností neslouží ke snížení odběru elektrické energie ze sítě, ale slouží k navýšení výkonu motoru při stejných rozměrech. [5]

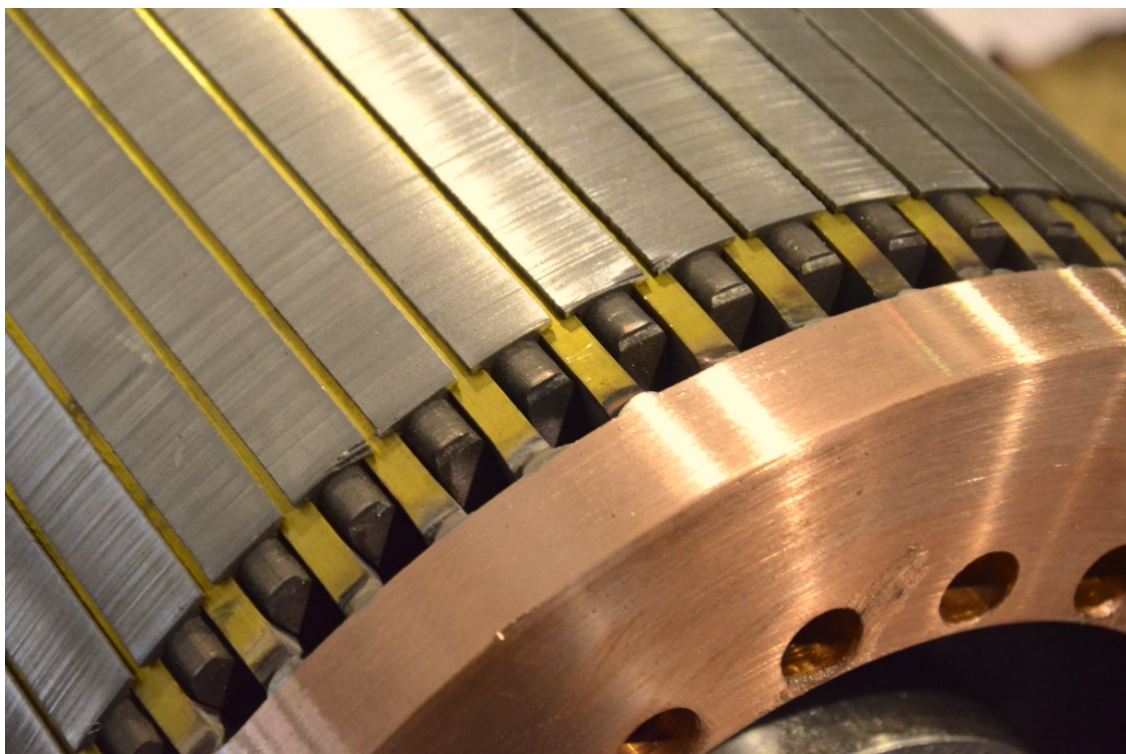
3.1.2 Montované rotorové klece

Montované rotorové klece se používají převážně u malých motorů kusové výroby, protože je to mnohem levnější způsob výroby, než odlévané klece nebo u motorů velkých výkonů, kde by bylo příliš drahé a složité odlévat kvalitní rotorovou klec. Nejčastěji se používají mosazné nebo měděné tyče, které jsou u malého motoru pomocí cínové pájky připájeny k měděným kruhům nakrátko. Zatímco u velkých motorů se tyto tyče s kruhy nakrátko svařují.

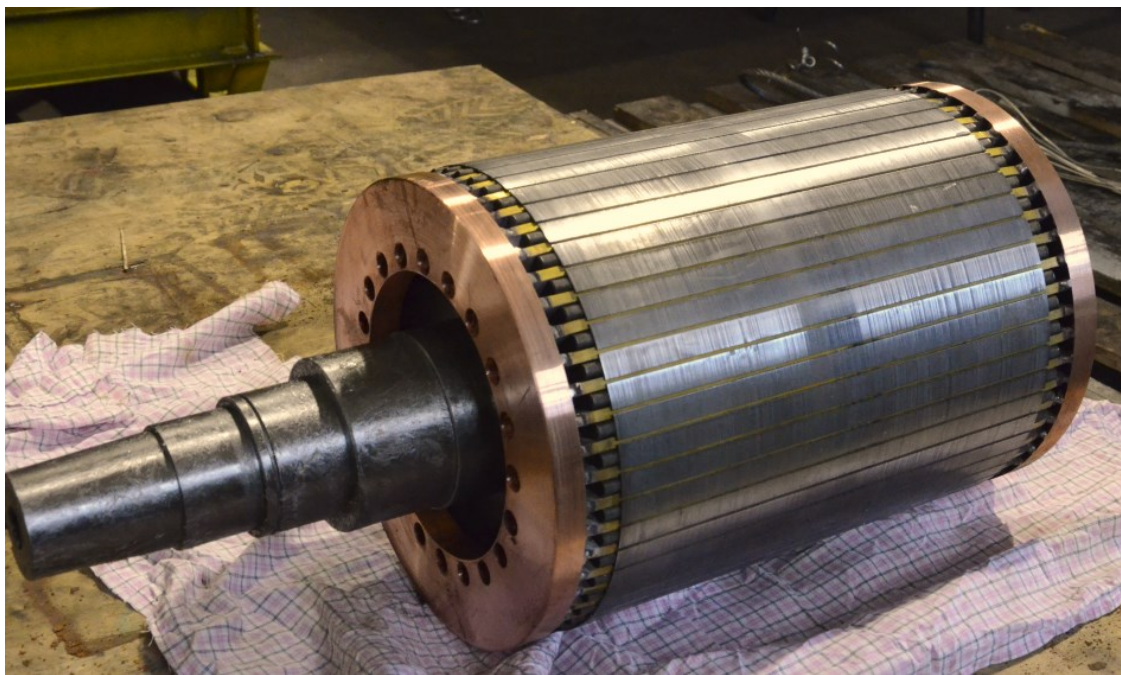
Jednotlivé tyče i části kruhu mohou mít z různých výrobních, technologických a provozních důvodů různé elektrické odpory.

Volbou rozměrů nebo volbou materiálu volíme hustotu proudu v kruzích nakrátko tak, aby byla cca o 20% nižší než v tyčích. U montovaných klecí používáme především měděné kruhy nakrátko. Protože kruhy nakrátko fungují jako radiátory, které slouží k odvodu tepla z tyčí rotoru. Proto musí mít kruhy nakrátko lepší ochlazovací podmínky než samotné tyče. Dalším důvodem nižší proudové hustoty v kruzích nakrátko je snížení celkového odporu rotorového vinutí, které se používá ke zlepšení rozběhových charakteristik u strojů využívajících povrchového jevu. [4]
[6]

U svařovaného vinutí bývají kruhy nakrátko vzdáleny od magnetického obvodu rotoru. To je dáno z technologických důvodů při svařování a pro zvětšení plochy chlazení, protože na rozdíl od litých klecí nemají žádné ventilační lopatky.



Obr. 3.7: *Detail kotvy*



Obr. 3.8: *Montovaná rotorová kotva*

U rotorových klecí z mosazných tyčí a měděných kruhů dochází při jejich montáži vlivem vysoké teploty, vznikající při svařování, k navyšování odporu jednotlivých tyčí. Navíc při každém rozběhu, brzdění, zatížení nebo reverzace motoru dochází k proudovým a momentovým rázům, které způsobují mechanické namáhání a otřesy rotoru. Vlivem tohoto namáhání a otřesu dochází k postupnému uvolňování mechanických spojů jednotlivých tyčí, které poté navyšují svůj elektrický odpor, přičemž vzniká nesymetrické zatížení rotoru mající za následek zhoršení provozních vlastností stroje, jako například zvýšené oteplení nepoškozené části vinutí, vznik parazitních momentů a podobně. Tato nesymetrie se pak projevuje deformací magnetického pole ve vzduchové mezeře, se kterou se mění i magnetické a elektrické veličiny. Z tohoto důvodu nejsou tyto klece stavěny na časté spouštění, a proto mají horší mechanickou pevnost a horší odvod tepla.

4 Analytický návrh motoru

Tato kapitola vychází z literatury [4] a zabývá se analytickým návrhem asynchronního elektromotoru. Celý návrh elektromotoru slouží pro ověření již vyráběného nového elektromotoru.

Jedná se o nový asynchronní elektromotor s montovanou kotvou, který vychází z konceptu nahrazovaného elektromotoru s litým rotorovým vinutím

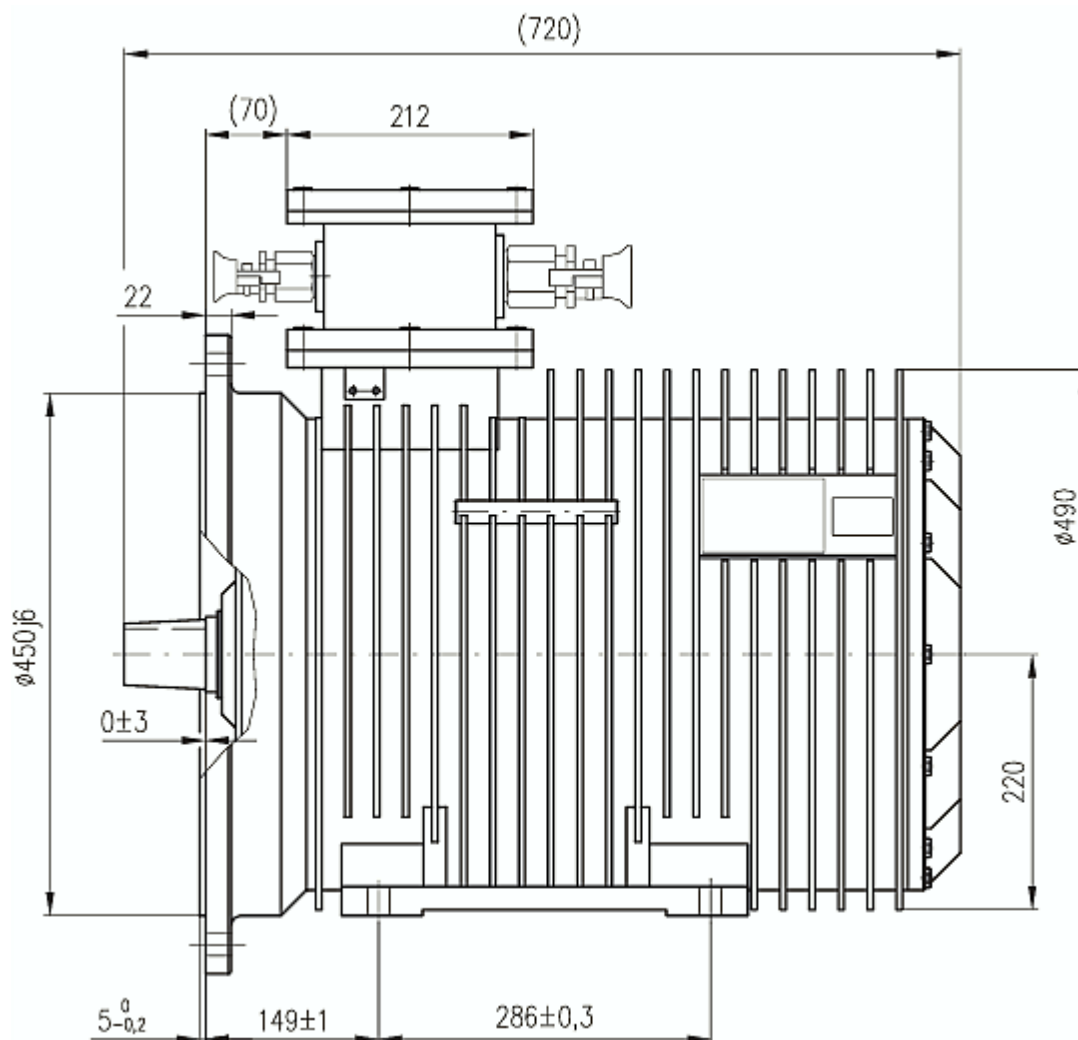
4.1 Parametry motoru

Tabulka 4.1: Šítkové hodnoty nového a původního motoru

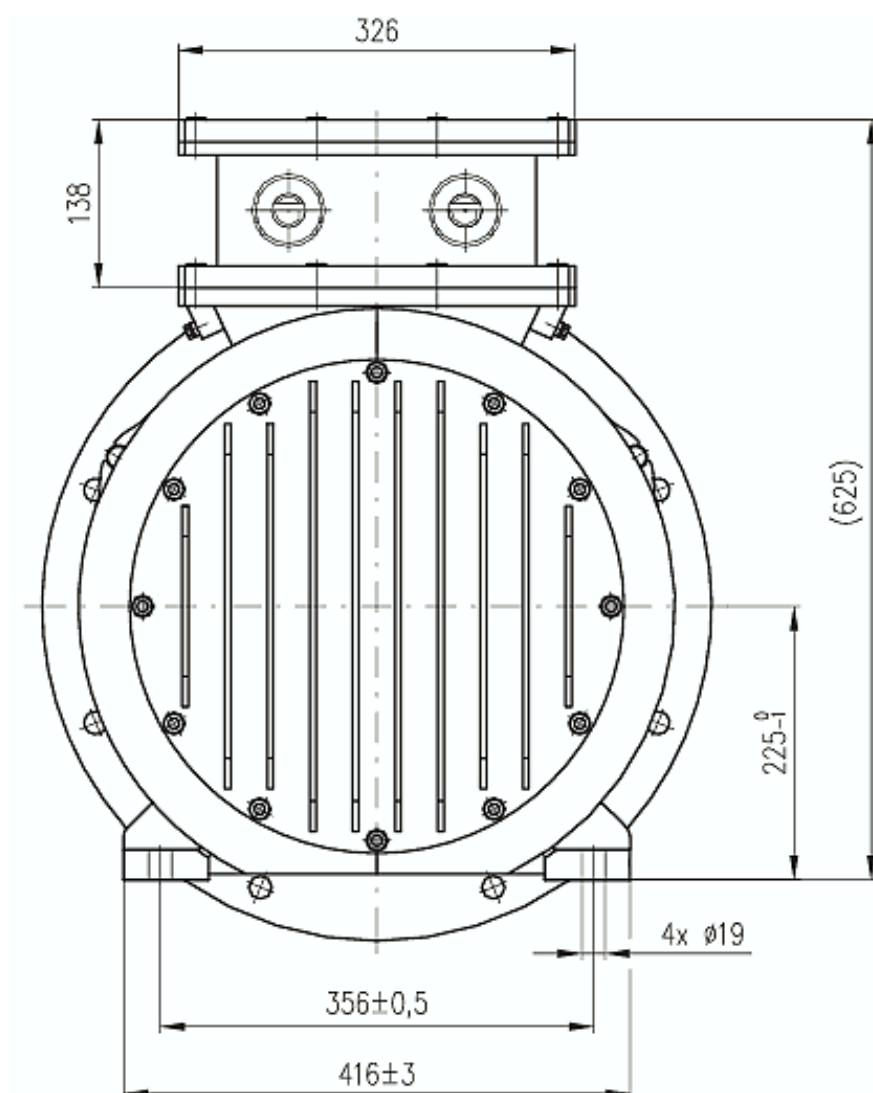
	Nový motor		Původní motor	
Výkon [kW]	18	36	18	36
zapojení	Δ	YY	Δ	YY
Moment [Nm]	237		-	
Napětí [V]	1140		1140	
Proud [A]	19,8	22,9	17,8	21
Frekvence [Hz]	50	50	50	50
Otáčky [ot./min]	730	1445	740	1465
Účinník [-]	0,54	0,94	0,53	0,93
Účinnost [-]	0,854	0,879	0,96	0,92
Počet polpárů	8	4	8	4
Režim práce	S6 – 25%	S6 – 40%	S6 – 25%	S6 – 40%

4.2 Rozměry motoru

Na následujících obrázcích jsou zachyceny rozměry původního elektromotoru, které jsou shodné s nově vyrobeným elektromotorem.



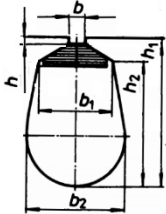
Obrázek 4.1: *Rozměry motoru, pohled z boku*



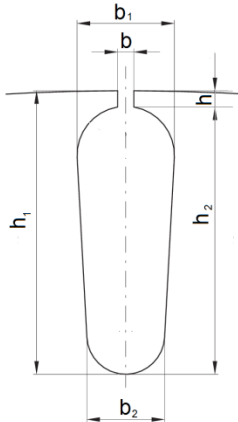
Obrázek 4.2: Rozměry motoru, pohled ze předu

4.3 Parametry magnetického obvodu

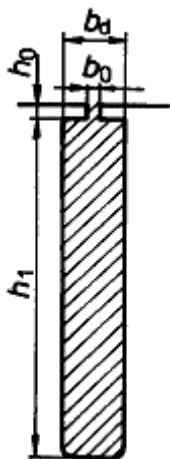
Tabulka 4.2: *Informace o statoru*

Drážek	72
Délka železa	300mm
Vrtání železa	270mm
Vnější průměr magnetického obvodu	367mm
Vyložení čel vinutí na straně zapojení vinutí / proti zapojení vinutí	75/75mm
Drážka statoru	
Drážkový rozměr $b_1/ b_2/b$	6,0/8,0/3,5mm
Drážkový rozměr $h_1/ h_2/h$	27,5/25,5/1,0mm
Druh vinutí	DVOUVRSTVÉ
Počet paralelních větví vinutí	2
Cívkové skupiny	2× trojcívka, zapojení do série v šesticívku
Vodič	1× Ø 1,25
Zapojení vinutí	Dahlander Δ/YY

Tabulka 4.3: *Informace o litém rotoru*

Drážek	56
Délka železa	300mm
Vnější průměr magnetického obvodu rotoru	268mm
Vnitřní průměr magnetického obvodu rotoru	85mm
Materiál rotorové klece rozběhové/běhové	Al
Drážka rotoru	
Drážkový rozměr $b_1/ b_2/ b$	9,0/4,8/1,4mm
Drážkový rozměr $h_1/ h_2/ h$	17,5/16,0/1,5mm
Rotorový kruh $D_1/ D_2/ t$	267,0/162,0/18mm

Tabulka 4.4: *Informace o montovaném rotoru*

Materiál rotorové tyče/kruhu	Mosaz / měď
Drážka rotoru	
Drážkový rozměr b_0/ b_1	6,0/2,0mm
Drážkový rozměr h_0/ h_1	16,0/1,2mm
Rotorový kruh $D_1/ D_2/ t$	267,0/163/20mm

4.4 Volba hlavních rozměrů a návrh statorového vinutí

Protože se jedná o návrh motoru vycházejícího z původního motoru, je návrh motoru značně ulehčen o jeho rozměry, které jsou zde přepočítány.

Z obrázku 4.1 vyčteme osovou výšku motoru.

$$h = 225 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Tabulka 4.5: *Osové výšky elektrických strojů a jim odpovídající velikosti statorových plechů*

h (mm)	56	63	71	80	90	100	112	132
D_e (m)	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225
h (mm)	160	180	200	225	250	280	315	355
D_e (m)	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

Odečtená velikost vnějšího průměru statorového plechu ze zadávací tabulky 4.2 vyrobeného motoru.

$$D_e = 367 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Odečtenou hodnotu vnějšího průměru velikosti statorového plechu ze vztahu 4.2 můžeme porovnat s normalizovanými hodnotami pro asynchronní motory jednotné řady A4 z tabulky 4.5, kde je vidět, že došlo ke zmenšení průměru, které může způsobovat nárůst elektromagnetického zatížení. [4]

Kde K_D je poměr D/D_e , který volíme z tabulky 4.6

Tabulka 4.6: *K_D podle počtu pólů*

$2p$	2	4	6	8	10 až 12
K_D	0,52 až 0,57	0,62 až 0,68	0,70 až 0,72	0,74 až 0,75	0,75 až 0,77

volím

$$K_D = 0,74 \quad (4.3)$$

Výpočet vnitřního průměru statorových plechů

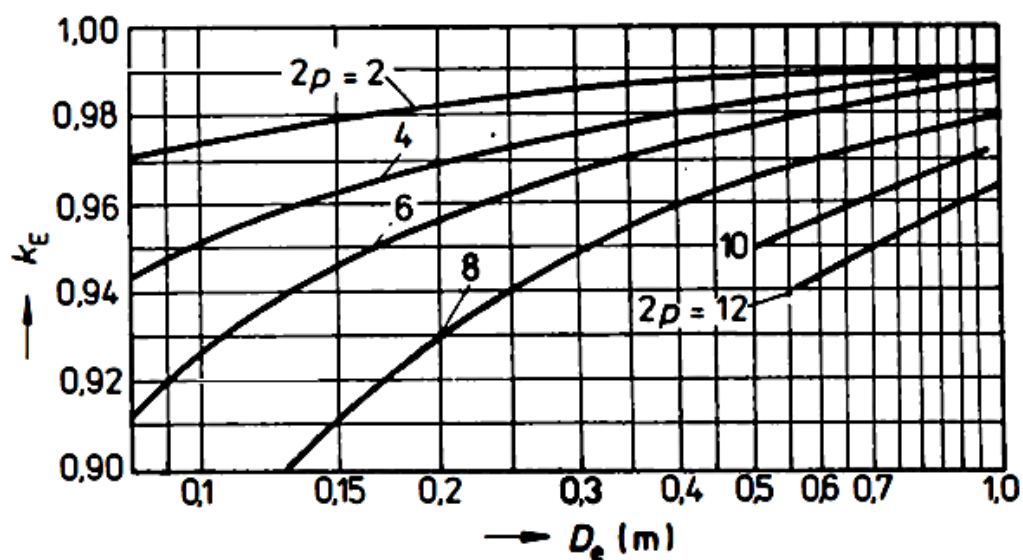
$$D = K_D \cdot D_e = 0,74 \cdot 367 = 271,58 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Odečtená hodnota ze zadávacího návrhu

$$D = 270 \text{ mm} \quad (4.5)$$

Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,27}{8} = 0,106 \text{ m} \quad (4.6)$$



Obrázek 4.3: Hodnoty činitele K_E

Poměr indukovaného napětí vinutí statoru ke jmenovitému napětí odečtený z obrázku 4.3

$$k_E = 0,957 \quad (4.7)$$

Vnitřní výkon

$$P_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 18000 \cdot \frac{0,957}{0,854 \cdot 0,54} = 36567 \text{ VA} \quad (4.8)$$

Synchronní úhlová rychlost hřídele

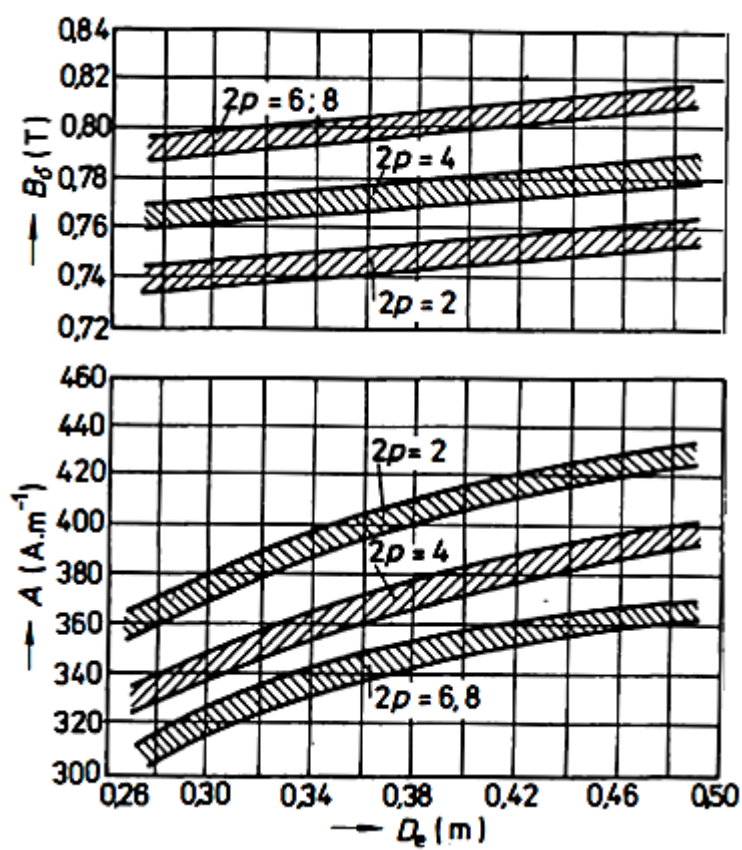
$$\omega_s = 2\pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2\pi \cdot \frac{50}{4} = 78,54 \text{ rad/s} \quad (4.9)$$

Činitel tvaru pole

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11 \quad (4.10)$$

Zvolený činitel plnění

$$k_{v1} = 0,92 \quad (4.11)$$



Obrázek 4.4: Lineární hustota proudu a indukce ve vzduchové mezeře

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře odečtena z obrázku 4.4

$$B_{\delta} = 0,8 \text{ T} \quad (4.12)$$

Lineární hustota proudu odečtená z obrázku

$$A = 36000 \text{ A/m} \quad (4.13)$$

Ideální délka vzduchové mezery

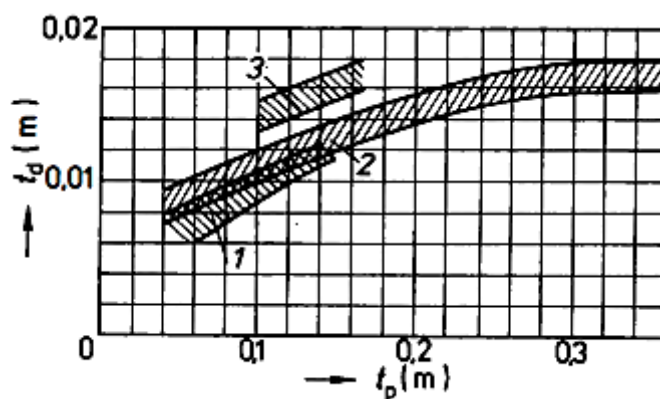
$$l_i = \frac{P_i}{k_B \cdot D^2 \cdot \omega_s \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_{\delta}} = \frac{36567}{0,957 \cdot 0,27^2 \cdot 78,54 \cdot 0,91 \cdot 3600 \cdot 0,8} = 0,217 \text{ m} \quad (4.14)$$

Délka vzduchové mezery dle zadávací tabulky 4.2

$$l_i = 0,3 \text{ m} \quad (4.15)$$

Štíhlostní poměr

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} = \frac{0,3}{0,106} = 1,65 \quad (4.16)$$



Obrázek 4.5: Drážkové rozteče statoru

Z obrázku 4.5 odečteme hodnoty drážkové rozteče $t_{d1\ max}$ a $t_{d1\ min}$, kde číslem 2 je označena charakteristika pro osové výšky strojů od 90mm do 250mm. [4]

$$t_{d1\ max} = 0,01m \quad (4.17)$$

$$t_{d1\ min} = 0,012m \quad (4.18)$$

Potom je možné vypočítat počet drážek statoru

$$Q_{1\ min} = \frac{D_e}{t_{d1\ max}} = \frac{0,376}{0,01} = 70,69 \quad (4.19)$$

$$Q_{1\ max} = \frac{D_e}{t_{d1\ min}} = \frac{0,376}{0,012} = 84,82 \quad (4.20)$$

Volím podle zadávací tabulky 4.2

$$Q_1 = 72\ drážek \quad (4.21)$$

Jak je vidět, s počtem drážek statoru ze zadávacího návrhu se vejde do vypočteného rozmezí.

Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{72}{8 \cdot 3} = 3 \quad (4.22)$$

Kde m je počet fází

$$m = 3 \quad (4.23)$$

Počet drážek na pól a fázi q by mělo být celé číslo. Pokud by q nebylo celé číslo, vedlo by to k jisté nesymetrii magnetomotorického napětí. [4]

Konečná hodnota drážkové rozteče

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,27}{8 \cdot 3 \cdot 3} = 0,0117\ m \quad (4.24)$$

Jmenovitý proud vinutí statoru

$$I_{1N} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1N} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{18000}{3 \cdot 660 \cdot 0,854 \cdot 0,54} = 19,71 \text{ A} \quad (4.25)$$

kde

$$U_{1N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{1140}{\sqrt{3}} = 660 \text{ V} \quad (4.26)$$

Předběžný počet efektivních vodičů v drážce

$$V'_d = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,27 \cdot 36000}{19,71 \cdot 72} = 21,4 \quad (4.27)$$

Protože se jedná o zapojení do trojúhelníku, bude počet paralelních větví vinutí

$$a = 1 \quad (4.28)$$

Počet efektivních vodičů v drážce

$$V_d = a \cdot V'_d = 1 \cdot 21,4 = 21,4 \rightarrow 14 \quad (4.29)$$

Protože se jedná o motor v Dahlanderově zapojení trojúhelník a dvojité hvězda, kde při změně zapojení zůstává konstantní moment a mění se výkon, je třeba počítat i s návrhem motoru pro $2p = 4$, kde bude počet paralelních větví $a = 2$. Tudíž se změní i počet efektivních vodičů v drážce. Proto je zvolen počet efektivních vodičů v drážce tak, aby vyhovoval oběma zapojením. Pro tohle zapojení je zvoleno $V_d = 14$.

Konečný počet závitů ve fázi

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{14 \cdot 72}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 168 \quad (4.30)$$

Konečná lineární hustota proudu

$$A_{skut} = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 168 \cdot 19,71}{\pi \cdot 0,27} = 23426,24 \text{ A/m} \quad (4.31)$$

Zkrácení kroku pro dvouvrstvé vinutí

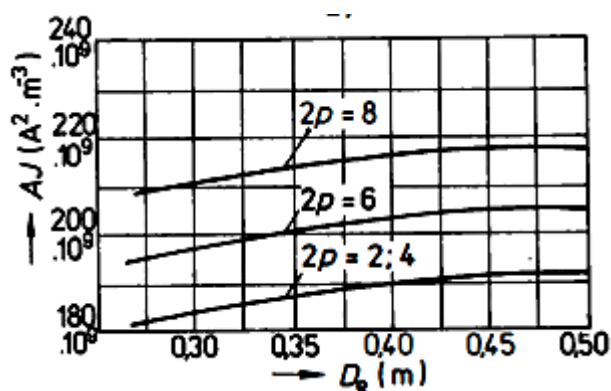
$$\beta = 0,833 \quad (4.32)$$

Magnetický tok

$$\phi = \frac{k_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1}} = \frac{0,957 \cdot 660}{4 \cdot 1,11 \cdot 168 \cdot 50 \cdot 0,927} = 0,0164 \text{ Wb} \quad (4.33)$$

Skutečná magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$B_{\delta skut} = \frac{p \cdot \phi}{D \cdot l_i} = \frac{4 \cdot 0,0164}{0,27 \cdot 0,3} = 0,81 \text{ T} \quad (4.34)$$



Obrázek 4.6: Střední hodnoty součinu A, J

Součinitel lineární hustoty proudu a hustoty proudu ve vinutí určený z obrázku 4.6

$$AJ = 2,45 \times 10^{11} \text{ A}^2/\text{m}^3 \quad (4.35)$$

Lineární hustota proudu

$$J = \frac{AJ}{A_{skut}} = \frac{2,45 \times 10^{11}}{23426} = 10,45 \times 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (4.36)$$

Průřez efektivního vodiče

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J} = \frac{19,71}{1 \cdot 10,45 \times 10^6} = 1,88 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (4.37)$$

Průměr

$$d_{ef\ 1} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{ef\ 1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,88 \times 10^{-6}}{\pi}} = 1,55\ mm \quad (4.38)$$

Volím průměr podle zadávací tabulky 4.2

$$d_i = 1,25\ mm \quad (4.39)$$

Průřez vodiče

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,25^2}{4} = 1,23\ mm^2 \quad (4.40)$$

Skutečná proudová hustota

$$J_{skut} = \frac{I_{1N}}{a \cdot S_1} = \frac{19,71}{1 \cdot 1,23 \times 10^{-6}} = 16,06\ A/mm^2 \quad (4.41)$$

4.4.1 Výpočet rozměrů drážek a zubů statoru

Tabulka 4.7: Dovolení hodnoty magnetické indukce B

Část magnetického obvodu	Označení	IP 44				
	2p	2	4	6	8	10 a 12
Jho statoru	B_{j1}	1,4 až 1,6			1,15 až 1,35	1,1 až 1,2
Zuby statoru s rovnoběžnými stěnami (vsypávané vinutí, drážky S, L)	B_{z1}	1,7 až 1,9				1,6 až 1,8
Zuby statoru v nejužším průřezu drážky polozařené F	B_{z1max}	1,75 až 1,95				
drážky otevřené N, M		1,6 až 1,8				
Jho rotoru nakrátko kroužkového motorů na 6 000 V	B_{j2}	≤ 1,45 — —	≤ 1,25 ≤ 1,25 ≤ 1,55	≤ 1,15 ≤ 1,05 ≤ 1,30	≤ 0,85 ≤ 0,75 ≤ 1,0	
Zuby rotoru s rovnoběžnými stěnami (drážky V, W)	B_{z2}	1,75 až 1,85				
Zuby v nejužším průřezu rotoru nakrátko kroužkového	B_{z2max}	— —	1,5 až 1,7 1,85 až 2,05	1,45 až 1,60 1,75 až 1,9		

Hodnoty vyčtené z tabulky 4.7

$$B_{j1} = 1,3T \quad (4.42)$$

$$B_{z1} = 1,7T \quad (4.43)$$

Tabulka 4.8: *Doporučené izolace plechů a činitele plnění železa*

h (mm)	$U(V)$	Stator		Rotor nakrátko		Rotor kroužkový	
		způsob izolace	k_{Fe}	způsob izolace	k_{Fe}	způsob izolace	k_{Fe}
50 až 250	≤ 660	vrstva oxidu	0,97	vrstva oxidu	0,97	—	—
280 až 355	≤ 660	lakování	0,95	vrstva oxidu	0,97	lakování	0,95
400 až 560	6 000	lakování	0,95	lakování	0,95	lakování	0,95

Izolace plechů – vrstva oxidu odečtena z tabulky 4.8

$$k_{Fe} = 0,97 \quad (4.44)$$

Výška jha statoru

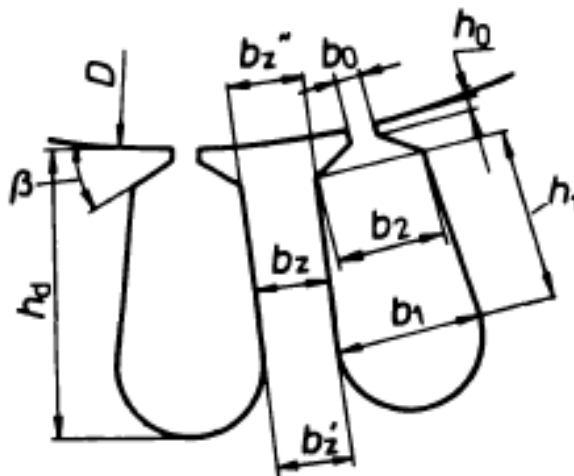
$$h_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0164}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,3 \cdot 0,97} = 21,74 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.45)$$

Minimální šířka zubů

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta skut} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{B_{z1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,0117 \cdot 0,3}{1,7 \cdot 0,3 \cdot 0,97} = 5,8 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.46)$$

Rozměry drážek statoru se volí tak, aby zuby měly rovnoběžné stěny, protože v zubech s konstantním průřezem je konstantní i magnetická indukce a tím i menší konstantní magnetické napětí. U zubů s proměnnou šířkou se mění intenzita magnetického pole a s ní i výsledné magnetické napětí. [4]

Volím S drážku podle zadávací tabulky 4.2



Obrázek 4.7: Statorová drážka

Předběžná výška drážky

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{0,367 - 0,27}{2} - 21,74 \times 10^{-3} = 26,75 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.47)$$

Šířka drážky u paty zubu

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{d1})}{Q_1} - b_{z1} = \\ &= \frac{\pi \cdot (0,27 + 2 \cdot 26,75 \times 10^{-3})}{72} - 5,8 \times 10^{-3} = 8,18 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned} \quad (4.48)$$

Výška otevřené drážky musí být dostatečně silná pro k zajištění mechanické pevnosti hlav zubů, zároveň se ale volí co nejmenší, protože vede k růstu rozptylového toku drážky. [4]

Volí se v rozmezí

$$h_0 = 0,5 - 1mm \quad (4.49)$$

Volím podle zadávací tabulky 4.2

$$h_0 = 1 mm \quad (4.50)$$

Otevření drážky se volí tak, aby bylo možné vkládat do drážky izolované vodiče s respektováním tloušťky izolačních technologických vložek jako ochrana proti mechanickému poškození při vkládání vinutí. [4]

Volí se v rozmezí

$$b_0 = 1,8 - 4mm \quad (4.51)$$

Volím podle zadávací tabulky 4.2

$$b_0 = 3,5 mm \quad (4.52)$$

Šířka drážky v horní části zubu

$$b_2 = \frac{\pi \cdot \left(D + 2 \cdot h_0 - \frac{b_0}{\sqrt{3}} \right) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1 - \frac{\pi}{\sqrt{3}}} = \quad (4.53)$$
$$= \frac{\pi \cdot \left(0,27 + 2 \cdot 1 \times 10^{-3} - \frac{3,5 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} \right) - 72 \cdot 5,8 \times 10^{-3}}{72 - \frac{\pi}{\sqrt{3}}} = 6,13 \times 10^{-3} mm$$

Výška klínové části se volí

$$h_k = 0,9 - 4,6mm \quad (4.54)$$

Výška klínové části drážky

$$h_k = \frac{b_2 - b_0}{\sqrt{3} \cdot 2} = \frac{6,13 \times 10^{-3} - 3,25 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot 2} = 0,76 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.55)$$

Tabulka 4.9: Porovnání vypočtených rozměrů satorové drážky se skutečnými

	Vypočtené hodnoty (mm)	Skutečné hodnoty (mm)
h_{d1}	26,76	27,5
b_1	8,31	8
b_0	3,5	3,5
h_0	1	1
b_2	6,13	6
h_k	0,76	1

Aktivní hloubka drážky

$$h_1 = h_{d1} - \left(h_0 + h_k + \frac{b_1}{2} \right) = \quad (4.56)$$

$$= 27,5 \times 10^{-3} - \left(1 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-3} + \frac{8 \times 10^{-3}}{2} \right) = 21,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Tabulka 4.10: Zvětšení drážek o přídávku na skládání

výška osy h mm	Přidavky (mm)	
	na šířku Δb_d	na výšku Δh_d
50 až 132	0,1	0,1
160 až 250	0,2	0,2
280 až 355	0,3	0,3
400 až 560	0,4	0,3

Výpočet světých rozměrů drážky s uvažováním vůlí na skládání plechů a nepřesnosti vzniklé při lisování odečtené z tabulky 4.10.

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_d = 8 - 0,2 = 7,8 \text{ mm} \quad (4.57)$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_d = 6 - 0,2 = 5,8 \text{ mm} \quad (4.58)$$

$$h'_1 = h_1 + \frac{b_1}{2} - \Delta h_d = 21,5 + 4 - 0,2 = 25,3 \text{ mm} \quad (4.59)$$

Dle tabulky 4.9 lze vidět, že vypočtený návrh statoru relativně odpovídá skutečnému stavu vyráběného elektromotoru. Protože se ale jedná o motor v Dahlanderově zapojení, kde je možné zapojením měnit počet pólových dvojic, je zapotřebí udělat návrh i pro zapojení do dvojité hvězdy, pro počet paralelních vodičů $a = 2$, který by se počítal obdobným způsobem. Při tom by ale vyšly jiné rozměry statorových drážek. Z důvodu zachování rozměrů statoru, podle zadávací tabulky 4.2, byl zvolen optimální počet efektivních vodičů v drážce $V_d = 14$ pro zapojení do trojúhelníku a $V_d = 28$ pro zapojení dvojité hvězdy.

4.1 Volba vzduchové mezery

Velikost vzduchové mezery δ určuje energetické ukazatele asynchronního motoru.

Pokud budeme vzduchovou mezeru zmenšovat, bude s ní zároveň klesat i magnetický odpor a magnetické napětí, které tvoří hlavní část magnetomotorického napětí celého magnetického obvodu stroje. S klesajícím magnetomotorickým napětím klesá i magnetizační proud motoru, se kterým roste účinník $\cos\varphi$ a klesají ztráty ve vinutí statoru. Tyto menší ztráty samozřejmě znamenají do určité míry nárůst účinnosti η . [4]

Ovšem přílišné zmenšení vzduchové mezery vede k nárůstu amplitud pulzující magnetické indukce ve vzduchové mezeře a zvětšení povrchových a pulsních ztrát. Velmi malé vzduchové mezery jsou těmito povrchovými a pulsními ztrátami značně ovlivněny, proto se při určité velikosti účinnosti už nezvětšuje, ale naopak často klesá. [4]

Povrchové a pulsní ztráty závisí i na frekvenci pulzující indukce, která je dána otáčkami motoru. Pro zmenšení těchto ztrát se volí větší vzduchová mezera u rychloběžných motorů.

Z toho důvodu se volí optimální vzájemný poměr, při kterém jsou celkové ztráty ve vzduchové mezeře minimální s ohledem na rozměry stroje, kde se musí počítat s výrobními tolerancemi a mechanickými vlastnostmi materiálu, jako například teplotní roztažnost materiálu nebo průhyby hřídele, tak aby nedošlo k zadření rotoru. [4]

Vypočtená velikost vzduchové mezery

$$\delta = \frac{D - D_2}{2} = \frac{270 - 268}{2} = 1mm \quad (4.60)$$

4.2 Výpočet rotoru nakrátko

Vnější průměr rotoru se volí podle vnitřního průměru statoru se započítáním vzduchové mezery.

Odečtený vnější průměr ze zadávací tabulky 4.3

$$D_2 = 268 \text{ mm} \quad (4.61)$$

Tabulka 4.11: Činitel pro k_h výpočet průměru hřídele

h (mm)	50 až 63	71 až 250	280 až 355		400 až 500		
$2p$	2 až 6	2 až 8	2	4 až 12	4	6	8 až 12
k_h	0,19	0,23	0,22	0,23	0,20	0,23	0,25

Činitel pro výpočet hřídele odečtený z tabulky 4.11

$$k_h = 0,23 \quad (4.62)$$

Průměr hřídele

$$D_h = k_h \cdot D_e = 0,23 \cdot 0,367 = 0,084 \text{ m} \quad (4.63)$$

Průměr hřídele podle zadávací tabulky 4.3

$$D_h = 0,085 \text{ m} \quad (4.64)$$

Drážková rozteč

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,268}{54} = 0,015 \text{ m} \quad (4.65)$$

Pole vzduchové mezery obsahuje vyšší harmonické, které indukují napětí v rotorovém vinutí a ty vyvolávají proudy v tyčích vinutí s velkým počtem harmonických. Vzájemné působení proudů a polí s vyššími harmonickými vytváří elektromagnetické momenty, které značně zhoršují mechanické vlastnosti motoru. Jejich vliv na moment od pracovní harmonické se projevuje sedly v momentové charakteristice. [4]

V poli vzduchové mezery jsou takzvané zubové harmonické, které jsou patrné zvláště při malé vzduchové mezeře, vyvolávají hluk a vibrace stroje v normálním chodu. [4]

Veškeré působení těchto harmonických lze do značné míry ovlivnit optimálním poměrem drážek statoru Q_1 a drážek rotoru Q_2 , kde se pro omezení asynchronních momentů od vyšších harmonických volí $Q_2 < Q_1$. [4]

Tabulka 4.12: Doporučené počty drážek rotoru Q_2 při známém počtu drážek statoru Q_1

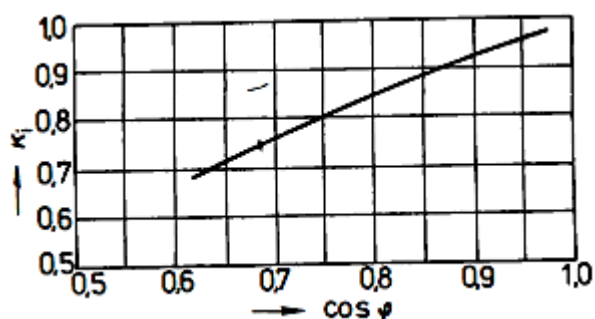
$2p$	Q_1	Q_2	
		drážky nenatočené	drážky natočené
2	12	9*, 15*	—
	18	11*, 12*, 15*, 21*, 22*	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35
	24	15*, (16*), 17*, 19, 32	18, 20, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	—
4	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
	12	9*	15*
	18	10*, 14*	18*, 22*
	24	15*, 16*, 17, (32)	16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (38), (39), 40, (44), 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
6	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83

Tabulka 4.12: Pokračování

$2p$	Q_1	Q_2	
		drážky nenatočené	drážky natočené
8	48	(34), 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146	90, 101, 103, 117, 123, 137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109),
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163
	84	74, 94, 102, 104, 106	75, 77, 79, 89, 91, 93, 103

Lze vidět, že počet drážek rotoru odpovídá doporučenému počtu podle zadávací tabulky 4.3

$$Q_2 = 56 \text{ drážek} \quad (4.66)$$



Obrázek 4.8: Činitel uvažující vliv magnetizačního proudu v závislosti na $\cos \varphi$

Činitel uvažující vliv magnetizačního proudu a odporu vinutí určený z obrázku 4.8

$$k_i = 0,62 \quad (4.67)$$

Činitel přepočtu proudu

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 168 \cdot 0,927}{56} = 16,69 \quad (4.68)$$

Proud v rotoru

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot p_i = 0,62 \cdot 19,71 \cdot 16,69 = 203,93 \text{ A} \quad (4.69)$$

Doporučená hustota proudu J_2 v tyčích rotoru s měděným rotorem a ofukováním povrchu u uzavřených strojů se volí v rozmezí $(4,5-8) \times 10^6 \text{ A/m}^2$

Volím hustotu proudu

$$J_2 = 2,1 \times 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (4.70)$$

Průřez tyče

$$S_t = \frac{I_{N2}}{J_2} = \frac{203,93}{2,1 \times 10^6} = 97,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (4.71)$$

Proudy v rotorových tyčích pootočený o úhel

$$\alpha = \frac{2p \cdot \pi}{Q_2} = \frac{8 \cdot \pi}{56} = 0,449 \quad (4.72)$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{0,349}{2}\right) = 0,445 \quad (4.73)$$

Proud v kruhu nakrátko

$$I_{kn} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{203,93}{0,445} = 458,23 \text{ A} \quad (4.74)$$

Zvolíme měděné kruhy nakrátko, protože proudová hustota v kruzích nakrátko se volí nižší z důvodu lepšího odvodu tepla.

Proudová hustota kruhu nakrátko

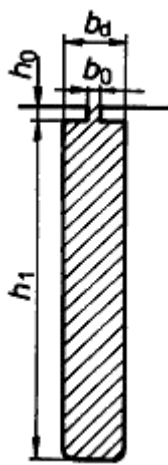
$$J_{kn} = 2 \times 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (4.75)$$

Příčný průřez kruhu nakrátko

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{458,22}{2 \times 10^6} = 104,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (4.76)$$

4.2.1 Výpočet drážek rotoru

Ze zadávací tabulky 4.4 vidíme, že jsou zvoleny drážky obdélníkového průřezu.



Obrázek 4.9: Drážka obdélníkového průřezu

Pro motory s osovou výškou od 160 mm do 250 mm se volí tyto rozměry.

$$b_0 = 1,5 \text{ mm} \quad (4.77)$$

$$h_0 = 0,7 \text{ mm} \quad (4.78)$$

Podle zadávací tabulky 4.4 volím

$$b_0 = 2 \text{ mm} \quad (4.79)$$

$$h_0 = 1,2 \text{ mm} \quad (4.80)$$

Volím magnetickou indukci dle tabulky 4.7

$$B_{z2} = 1,8 \text{ T} \quad (4.81)$$

Předběžná šířka zubu

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta skut} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{B_{z2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,015 \cdot 0,3}{1,8 \cdot 0,3 \cdot 0,97} = 6,9 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.82)$$

Horní část zubu

$$b_d = \frac{(t_{d2} - b_{z2}) + \sqrt{(t_{d2} - b_{z2})^2 - 1,1 \cdot S_t \cdot \frac{8\pi}{Q_2}}}{2} = \quad (4.83)$$

$$= \frac{(0,0015 - 6,99 \times 10^{-3}) + \sqrt{(0,0015 - 6,99 \times 10^{-3})^2 - 1,1 \cdot 97,1 \times 10^{-6} \cdot \frac{8\pi}{56}}}{2} =$$

$$= 6,06 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Hloubka drážky

$$h_1 = \frac{1,1 \cdot S_t}{b_1} = \frac{1,1 \cdot 97,1 \times 10^{-6}}{6,06 \times 10^{-3}} = 16,01 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.84)$$

Tabulka 4.13: *Porovnání vypočtených rozměrů drážek rotoru se skutečnými*

	Vypočtené hodnoty (mm)	Skutečné hodnoty (mm)
h_{d2}	17,21	17,2
b_d	6,06	6
b_0	-	2
h_0	-	1,2
h_1	16,01	16

Průřez hliníkové tyče původního motoru dle rozměrů z tabulky 4.3

$$\begin{aligned}
 S_{tskut} &= \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + 0,5 \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 = \\
 &= \frac{\pi}{8} \cdot ((9 \times 10^{-3})^2 + (4,8 \times 10^{-3})^2) + 0,5 \cdot (9 \times 10^{-3} + 4,8 \times 10^{-3}) \cdot 9,1 \times 10^{-3} = \\
 &= 103,65 \times 10^{-6} \text{ m}^2
 \end{aligned}
 \tag{4.85}$$

Průřez mosazné tyče nového motoru dle tabulky 4.4

$$S_{tskut} = b_1 \cdot h_1 = 6 \cdot 16 = 96 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \tag{4.86}$$

Hustota proudu v tyčích

$$J_{tskut} = \frac{I_2}{S_t} = \frac{203,93}{96 \times 10^{-6}} = 2,12 \times 10^6 \text{ A/m}^2 \tag{4.87}$$

Celý tento výpočet byl prováděn pro motor s $2p = 8$, kde tímto výpočtem byl ověřen návrh rotoru a statoru asynchronního motoru. Pravděpodobně podobným postupem bylo zřejmě postupováno při prvotním návrhu motoru, který již dosluhuje a bude nahrazován novým motorem. Dále byl ověřen návrh rotorových drážek.

Z výpočtů skutečného průřezu hliníkové i mosazné tyče lze vidět, že celková velikost průřezu se zase až tak neliší. Tyče se od sebe liší materiálem a tvarem, což má zásadní vliv na vlastnosti stroje.

Protože se volí nižší proudová hustota v kruzích nakrátko a původní motor měl lité rotorové vinutí, kde kruhy nakrátko obsahovaly lopatky pro lepší odvod tepla do okolí, zvolily se zde měděné kruhy nakrátko, protože měď má lepší elektrickou i tepelnou vodivost než mosaz.

4.3 Výpočet magnetického obvodu

Indukce v zubu statoru

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta skut} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,0117 \cdot 0,3}{6,06 \times 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 0,97} = 1,63 \text{ T} \quad (4.88)$$

Indukce v zubu rotoru

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta skut} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,015 \cdot 0,3}{7,66 \times 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 0,97} = 1,64 \text{ T} \quad (4.89)$$

Indukce ve jhu statoru

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} = \frac{0,367 - 0,27}{2} - 0,027,5 = 0,021 \text{ m} \quad (4.90)$$

$$B_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot h'_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0164}{2 \cdot 0,021 \cdot 0,3 \cdot 0,97} = 1,35 \text{ T} \quad (4.91)$$

Indukce ve jhu rotoru

$$h'_{j2} = \frac{D_2 - D_h}{2} - h_{d2} = \frac{0,268 - 0,085}{2} - 0,072 = 0,074 \text{ m} \quad (4.92)$$

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2 \cdot h'_{j2} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0164}{2 \cdot 0,074 \cdot 0,3 \cdot 0,97} = 0,38 \text{ T} \quad (4.93)$$

4.1 Velikost magnetického napětí

Carterův činitel

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3,5}{1}\right)^2}{5 + \frac{3,5}{1}} = 1,44 \quad (4.94)$$

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,0117}{0,0117 - 1,44 \cdot 1 \times 10^{-3}} = 1,14 \quad (4.95)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{2}{1}\right)^2}{5 + \frac{2}{1}} = 0,57 \quad (4.96)$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,015}{0,015 - 0,57 \cdot 1 \times 10^{-3}} = 1,04 \quad (4.97)$$

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} = 1,14 \cdot 1,04 = 1,18 \quad (4.98)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery

$$U_\delta = 1,59 \times 10^6 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c = 1,59 \times 10^6 \cdot 0,81 \cdot 1 \times 10^{-3} \cdot 1,18 = 1531,16 \text{ A} \quad (4.99)$$

Tabulka 4.14: Ztráty v plechu

Typical data for SURA® M470-50A						
T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz
0,1	0,03	0,10	52	0,13	0,19	0,52
0,2	0,12	0,28	68	0,42	0,76	1,98
0,3	0,25	0,49	77	0,78	1,58	4,16
0,4	0,42	0,72	84	1,21	2,62	6,90
0,5	0,61	0,98	91	1,71	3,86	10,3
0,6	0,82	1,27	98	2,26	5,29	14,3
0,7	1,05	1,59	106	2,86	6,94	19,2
0,8	1,30	1,94	114	3,59	8,86	25,2
0,9	1,57	2,34	124	4,30	11,2	32,3
1,0	1,87	2,79	136	5,22	13,7	40,6
1,1	2,21	3,34	152	6,04	16,6	50,4
1,2	2,59	4,02	178	7,29	19,9	61,7
1,3	3,01	4,97	224	8,32	23,7	74,6
1,4	3,53	6,65	326	9,72	28,1	89,9
1,5	4,13	11,2	630	11,4	32,7	105
1,6	4,78	27,6	1612			
1,7	5,39	74,2	3963			
1,8	5,82	163	7773			

Magnetické napětí zubu statoru, odečteno z tabulky 4.14

$$H_{z1} = 1650 \text{ A/m} \quad (4.100)$$

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{d1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,0275 \cdot 1650 = 90,75 \text{ A} \quad (4.101)$$

Magnetické napětí zubu rotoru

$$H_{z2} = 1700 \text{ A/m} \quad (4.102)$$

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{d2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,0172 \cdot 1700 = 58,48 \text{ A} \quad (4.103)$$

Činitel nasycení zubu

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{90,75 + 58,48}{1531,16} = 1,1 \quad (4.104)$$

Magnetické napětí jha statoru

$$H_{j1} = 275 \text{ A/m} \quad (4.105)$$

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,367 - 0,021)}{8} = 0,14 \text{ m} \quad (4.106)$$

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 0,14 \cdot 275 = 37,36 \text{ A} \quad (4.107)$$

Magnetické napětí jha rotoru

$$H_{j2} = 82 \text{ A/m} \quad (4.108)$$

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_h - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,085 - 0,0172)}{8} = 0,063 \text{ m} \quad (4.109)$$

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 0,063 \cdot 82 = 5,13 \text{ A} \quad (4.110)$$

Výsledné magnetické napětí

$$\begin{aligned} F_m &= U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} + U_\delta = \\ &= 90,75 + 58,48 + 37,36 + 5,13 + 1531,16 = 1722,88 \text{ A} \end{aligned} \quad (4.111)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{1722,88}{1531,16} = 1,13 \quad (4.112)$$

magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{4 \cdot 1722,88}{0,9 \cdot 3 \cdot 168 \cdot 0,927} = 16,39 \text{ A} \quad (4.113)$$

Poměrná jednotka magnetizačního proudu

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_{1n}} = \frac{16,39}{19,71} = 0,83 \quad (4.114)$$

Jestliže $i_\mu > 0,3$ až $0,35$, pak byly zvolené malé rozměry stroje, než bylo třeba a motor tak bude mít menší účinník a účinnost. [4]

4.2 Výpočet odporu a reaktancí

Ve statorovém vinutí si můžeme dovolit zanedbat vliv povrchového jevu, protože se vinutí skládá z jednotlivých, poměrně malých dílčích vodičů, ve kterých se povrchový jev téměř nevyskytuje. [4]

Tabulka 4.15: Činitele pro výpočet čel vyspávaného obvodu

Počet pólů $2p$	Cívky statoru			
	čela neizolovaná		čela izolovaná páskou	
	K_{ξ}	K_v	K_{ξ}	K_v
2	1,20	0,26	1,45	0,44
4	1,30	0,40	1,55	0,50
6	1,40	0,50	1,75	0,62
≥ 8	1,50	0,50	1,90	0,72

Činitele odečteny z tabulky 4.14

$$K_{\xi} = 1,9 \quad (4.115)$$

$$K_v = 0,72 \quad (4.116)$$

Délka přímé části cívky při výstupu z drážky z čela statorového svazku do začátku ohybu čela

$$B = 0,01 \text{ m} \quad (4.117)$$

Střední šířka cívky

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D + h_{d1})}{2p} \cdot \beta_1 = \frac{\pi \cdot (0,27 + 0,0275)}{8} \cdot 0,833 = 0,097 \text{ m} \quad (4.118)$$

Vyložení čela statorového vinutí

$$l_v = K_v \cdot b_c + B = 0,72 \cdot 0,097 + 0,01 = 0,08 \text{ m} \quad (4.119)$$

Délka čela

$$l_c = K_c \cdot b_c + 2B = 1,9 \cdot 0,097 + 2 \cdot 0,01 = 0,2 \text{ m} \quad (4.120)$$

Střední délka závitu

$$l_{av} = 2 \cdot (l_i + l_c) = 2 \cdot (0,3 + 0,2) = 1 \text{ m} \quad (4.121)$$

Celková délka vodiče

$$L_1 = l_{av} \cdot N_1 = 1 \cdot 168 = 168 \text{ m} \quad (4.122)$$

Měrný odpor mědi při teplotě okolí 20°C

$$\rho_{\vartheta Cu} = 1,75 \times 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{m} \quad (4.123)$$

Teplotní součinitel mědi

$$\alpha = 0,0068 \quad (4.124)$$

Měrný odpor mědi při pracovní teplotě 115°C

$$\rho_{\vartheta 115} = \rho_{\vartheta} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) = 1,75 \times 10^{-8} \cdot (1 + 0,0068 \cdot 95) = 2,89 \times 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{m} \quad (4.125)$$

Odpor fáze statorového vinutí

$$R_1 = k \cdot \rho_{\vartheta Cu 115} \cdot \frac{L_1}{S \cdot a} = 1 \cdot 2,89 \times 10^{-8} \cdot \frac{168}{1,23 \times 10^{-6} \cdot 1} = 3,99 \text{ } \Omega \quad (4.126)$$

Měrný odpor mosazi při teplotě okolí 20°C

$$\rho_{\vartheta mosaz} = 7,5 \times 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{m} \quad (4.127)$$

Teplotní součinitel mosazi

$$\alpha = 0,0015 \quad (4.128)$$

Měrný odpor mosazi při pracovní teplotě 115°C

$$\begin{aligned} \rho_{\vartheta mosaz 115} &= \rho_{\vartheta mosaz} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) = \\ &= 7,5 \times 10^{-8} \cdot (1 + 0,0015 \cdot 95) = 8,57 \times 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{m} \end{aligned} \quad (4.129)$$

Odpor tyče

$$R_t = \rho_{\vartheta mosaz115} \cdot \frac{l_i}{S_{tskut}} = 8,57 \times 10^{-8} \cdot \frac{0,34}{96 \times 10^{-6}} = 3,03 \times 10^{-4} \Omega \quad (4.130)$$

Odečtené hodnoty z tabulky 4.4 pro výpočet průřezu kruhu nakrátko

$$a = 20 \text{ mm} \quad (4.131)$$

$$b = \frac{D_1 - D_2}{2} = \frac{267 - 163}{2} = 52 \text{ mm} \quad (4.132)$$

Průřez kruhu nakrátko

$$S_{knskut} = a \cdot b = 20 \cdot 52 = 10,4 \text{ mm} \quad (4.133)$$

Odpor kruhu

$$R_{kn} = \rho_{\vartheta Cu115} \cdot \frac{\pi \cdot D}{S_{knskut}} = 2,89 \times 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,268}{104 \times 10^{-5}} = 4,17 \times 10^{-7} \Omega \quad (4.134)$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 4}{54} = 0,445 \quad (4.135)$$

Odpor fáze klece

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_{kn}}{\Delta} = 3,03 \times 10^{-4} + 2 \cdot \frac{4,17 \times 10^{-7}}{0,445} = 3,07 \times 10^{-4} \Omega \quad (4.136)$$

Přepočet odporu klece na stator

$$p_z = 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(168 \cdot 0,926)^2}{56} = 5168 \quad (4.137)$$

Přepočtený odpor rotoru

$$R'_2 = R_2 \cdot p_z = 3,07 \times 10^{-4} \cdot 5198,7 = 1,6 \Omega \quad (4.138)$$

Celkový odpor fáze

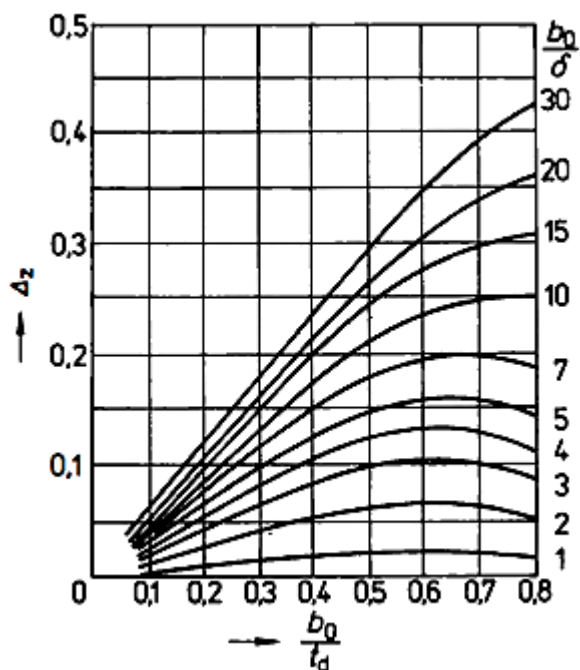
$$R = R_1 + R'_2 = 3,99 + 1,6 = 5,59 \, \Omega \quad (4.139)$$

$$k_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta)) = \quad (4.140)$$

$$= 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,883)) = 0,91$$

$$\frac{b_0}{t_{d1}} = \frac{0,0035}{0,0117} = 0,3 \quad (4.141)$$

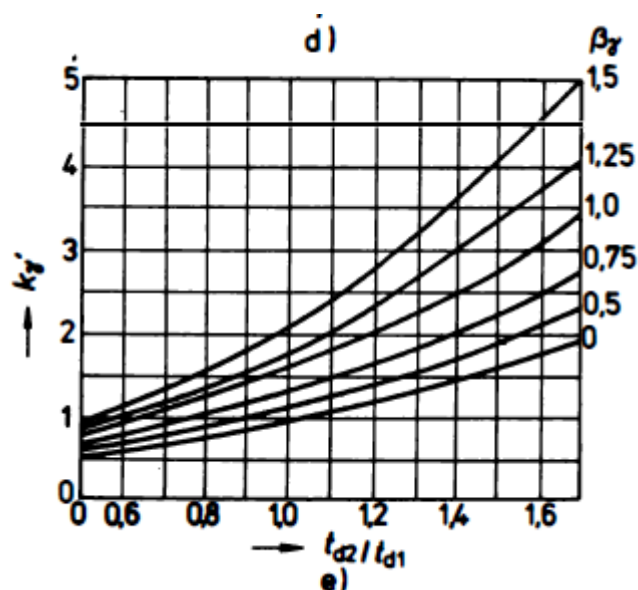
$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{0,0035}{0,001} = 3,5 \quad (4.142)$$



Obrázek 4.10: Činitel Δ_z v závislosti na b_0/t_{d1}

Činitel určený z obrázku

$$\Delta_z = 0,75 \quad (4.143)$$



Obrázek 4.11: Činitel k'_γ v závislosti na t_{d2}/t_{d1}

Činitel natočení drážek

$$\beta_\gamma = 0 \quad (4.144)$$

$$k'_\gamma = 1,4 \quad (4.145)$$

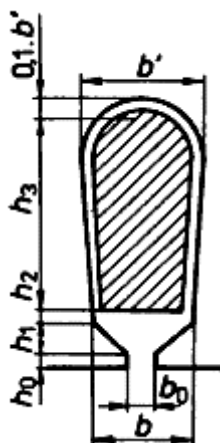
$$\begin{aligned} \xi &= 2 \cdot k'_\gamma \cdot k_\beta - k_{v1}^2 \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 = \\ &= 2 \cdot 1,4 \cdot 0,91 - 0,927^2 \cdot \left(\frac{0,015}{0,0117} \right)^2 = 1,14 \end{aligned} \quad (4.146)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu satorového vinutí

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{11,7}{12 \cdot 1 \cdot 1,18} \cdot 1,14 = 0,94 \quad (4.147)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel vinutí statoru

$$\begin{aligned} \lambda_{\xi 1} &= 0,34 \cdot \frac{q}{l_i} \cdot (l_\xi - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = \\ &= 0,34 \cdot \frac{3}{0,3} \cdot (0,2 - 0,64 \cdot 1,11 \cdot 0,117) = 0,44 \end{aligned} \quad (4.148)$$



Obrázek 4.12: Drážka statoru typu S

Činitel magnetické vodivosti drážky statoru

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) \cdot k'_\beta = \\ &= \frac{0,0255 - 2 \cdot 0,1 \cdot 0,008}{3 \cdot 0,006} \cdot 0,91 + \left(\frac{0,1 \cdot 0,008}{0,006} + \frac{3 \cdot 0,0001}{0,006 + 2 \cdot 0,0035} + \frac{0,001}{0,0035} \right) \cdot 0,87 \\ &= 1,13 \end{aligned} \quad (4.149)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_i}{q \cdot p} \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{\epsilon 1} + \lambda_{dif1}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{168}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,3}{3 \cdot 4} \cdot (1,13 + 0,44 + 0,94) = 1,4 \, \Omega \end{aligned} \quad (4.150)$$

$$\frac{b_0}{t_{d1}} = \frac{0,0014}{0,015} = 0,09 \quad (4.151)$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{0,0014}{0,001} = 1,4 \quad (4.152)$$

Pro $Q_2/p \geq 10$ je možné s dostatečnou přesností předpokládat

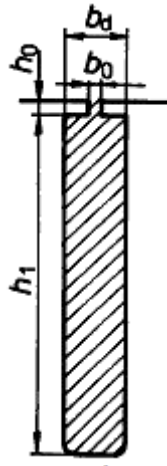
$$\xi \approx 1 - \Delta_{z2} = 1 - 0,75 = 0,25 \quad (4.153)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu klecového vinutí

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{15}{12 \cdot 1 \cdot 1,16} \cdot 0,25 = 0,27 \quad (4.154)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel vinutí statoru

$$\begin{aligned} \lambda_{\xi 2} &= \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l'_i \cdot \Delta^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot D_{kn}}{2 \cdot a_{kn} + b_{kn}} = \\ &= \frac{2,3 \cdot 0,2116}{56 \cdot 0,3 \cdot 0,75^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot 216}{2 \cdot 0,52 + 0,02} = 0,13 \end{aligned} \quad (4.155)$$



Obrázek 4.13: *Drážka rotoru*

Činitel magnetické vodivosti drážky rotoru

$$\begin{aligned} \lambda_{d2} &= \frac{h_1}{3 \cdot b} \cdot k_d + \frac{h_0}{b_0} = \\ &= \frac{16}{3 \cdot 6} \cdot 1 + \frac{1,2}{2} = 1,49 \end{aligned} \quad (4.156)$$

Kde pro jmenovitý chod je

$$k_d = 1 \quad (4.157)$$

Rozptylová reaktance klecového vinutí

$$\begin{aligned} X_{2\sigma} &= 7,9 \cdot f \cdot l_i \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{\kappa 2} + \lambda_{dif2}) = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,3 \cdot (1,49 + 0,0613 + 0,27) \cdot 10^{-6} = 0,22 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (4.158)$$

Přepočtená rozptylová reaktance rotoru na stator

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot p_z = 0,22 \times 10^{-3} \cdot 5168 = 1,16 \, \Omega \quad (4.159)$$

Impedance

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2} = \\ &= \sqrt{(3,99 + 1,6)^2 + (1,4 + 1,116)^2} = 6,15 \end{aligned} \quad (4.160)$$

Proud nakrátko

$$I_{1k} = \frac{U_{1N}}{Z} = \frac{660}{6,15} = 107,32 \, A \quad (4.161)$$

Účinník nakrátko

$$\cos \varphi_k = \frac{R}{Z} = \frac{5,59}{6,15} = 0,91 \quad (4.162)$$

4.3 Ztráty

Se ztrátami v železe u asynchronního motoru se počítá pouze se ztrátami ve statoru, neboť při rozběhu motoru rostou otáčky rotoru, klesá skluz a s ním i frekvence podle vztahu

$$f_2 = s \cdot f_1. \quad (4.163)$$

Proto lze ztráty v železe rotoru při jmenovitém chodu zanedbat. Pro rotor se počítají pouze elektrické ztráty a oteplení rotoru. [4]

Z tabulky 4.14 se odečte hodnota měrných ztrát v železe pro 1,0 T

$$\Delta p_i = 1,87 \text{ W/kg} \quad (4.164)$$

Činitele uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v magnetickém obvodu

$$k_{dj} = 1,6 \quad (4.165)$$

$$k_{dz} = 1,8 \quad (4.166)$$

Hustota oceli

$$\gamma_{Fe} = 7700 \text{ kg/m} \quad (4.167)$$

Hmotnost železa jha statoru

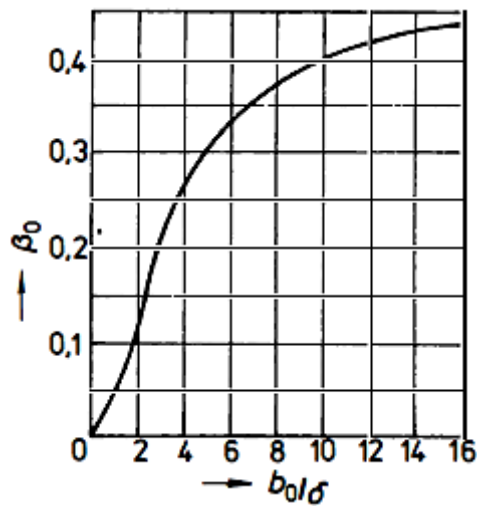
$$\begin{aligned} m_{j1} &= \pi \cdot (D_e - h_{j1}) \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = \\ &= \pi \cdot (0,367 - 0,021) \cdot 0,021 \cdot 0,3 \cdot 0,97 \cdot 7700 = 51,15 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.168)$$

Hmotnost železa v zubech statoru

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{d1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = \\ &= 0,0275 \cdot 6,06 \times 10^{-3} \cdot 72 \cdot 0,3 \cdot 0,97 \cdot 7700 = 27,42 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.169)$$

Hlavní ztráty v železe statoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{Feh} &= \Delta p_i \cdot (k_{dz} \cdot m_{z1} \cdot B_{z1}^2 + k_{dj} \cdot m_{j1} \cdot B_{j1}^2) = \\ &= 1,87 \cdot (1,8 \cdot 27,42 \cdot 1,63^2 + 1,6 \cdot 51,15 \cdot 1,35^2) = 522,12 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.170)$$



Obrázek 4.14: Činitel β_0 k výpočtu povrchových ztrát

$$\beta_{01} = 0,225 \quad (4.171)$$

$$\beta_{02} = 0,12 \quad (4.172)$$

Amplituda pulsující indukce ve vzduchové mezeře

$$B_{01} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,12 \cdot 1,18 \cdot 0,81 = 0,12 \text{ T} \quad (4.173)$$

$$B_{02} = \beta_{01} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,225 \cdot 1,18 \cdot 0,81 = 0,22 \text{ T} \quad (4.174)$$

$$k_{012} = 1,4 \quad (4.175)$$

Hustota povrchových ztrát statoru

$$\begin{aligned} p_{\delta p1} &= 0,5 \cdot k_{012} \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_{d2} \cdot 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,4 \cdot \left(\frac{56 \cdot 730}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,12 \cdot 0,015 \cdot 10^3)^2 = 17,43 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (4.176)$$

Hustota povrchových ztrát rotoru

$$\begin{aligned}
 p_{\delta p2} &= 0,5 \cdot k_{012} \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 = \\
 &= 0,5 \cdot 1,4 \cdot \left(\frac{72 \cdot 730}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,22 \cdot 0,0117 \cdot 10^3)^2 = 54,85 \text{ W/m}^2
 \end{aligned}
 \tag{4.177}$$

Celkové povrchové ztráty statoru

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\delta p1} &= p_{\delta p1} \cdot (t_{d1} - b_{01}) \cdot Q_1 \cdot l_{Fe} = \\
 &= 17,43 \cdot (0,0117 - 0,0035) \cdot 72 \cdot 0,3 = 3,12 \text{ W}
 \end{aligned}
 \tag{4.178}$$

Celkové povrchové ztráty rotoru

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\delta p2} &= p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe} = \\
 &= 4,85 \cdot (0,015 - 0,002) \cdot 56 \cdot 0,3 = 12,01 \text{ W}
 \end{aligned}
 \tag{4.179}$$

Pulzní indukce v zubech statoru a rotoru

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{01}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,0035}{0,001} \right)^2}{5 + \frac{0,0035}{0,001}} = 1,44
 \tag{4.180}$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,002}{0,001} \right)^2}{5 + \frac{0,002}{0,001}} = 0,57
 \tag{4.181}$$

Střední hodnoty indukce ve středním průřezu zubu pro určení pulzních ztrát

$$B_{p1} \approx \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d1}} \cdot B_{z1} = \frac{0,57 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,0117} \cdot 1,63 = 0,04 \text{ T}
 \tag{4.182}$$

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{z2} = \frac{1,44 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,015} \cdot 1,64 = 0,079 \text{ T} \quad (4.183)$$

Hmotnost železa v zubech rotoru

$$\begin{aligned} m_{z2} &= h_{d2} \cdot b_{z2} \cdot Q_2 \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = \\ &= 0,0172 \cdot 7,67 \times 10^{-3} \cdot 72 \cdot 0,3 \cdot 0,97 \cdot 7700 = 16,54 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.184)$$

Pulsní ztráty v zubech statoru a rotoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{p1} &\approx 0,11 \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n}{1000} \cdot B_{p1} \right)^2 \cdot m_{z1} = \\ &= 0,11 \cdot \left(\frac{56 \cdot 730}{1000} \cdot 0,04 \right)^2 \cdot 27,45 = 7,87 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.185)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{p2} &\approx 0,11 \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 \cdot m_{z2} = \\ &= 0,11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 730}{1000} \cdot 0,079 \right)^2 \cdot 16,54 = 31,15 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.186)$$

Dodatečné ztráty v železe

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fed} &= \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = \\ &= 3,12 + 12,01 + 7,87 + 31,15 = 54,15 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.187)$$

Celkové ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 522,12 + 54,15 = 576,27 \text{ W} \quad (4.188)$$

Ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{1n}^2 = 3 \cdot 3,99 \cdot 19,7^2 = 4653,99 \text{ W} \quad (4.189)$$

Ztráty v kleci rotoru

$$\Delta P_{j2} = Q_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 56 \cdot 3,07 \cdot 10^{-4} \cdot 19,7^2 = 715,47 W \quad (4.190)$$

Ztráty mechanické

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_e) = 1,3 \cdot (1 - 0,367) = 0,82 \quad (4.191)$$

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_e^4 = 0,82 \cdot \left(\frac{730}{10}\right)^2 \cdot 0,367^4 = 21,6 W \quad (4.192)$$

Dodatečné ztráty

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P = 0,005 \cdot 18000 = 90 W \quad (4.193)$$

Celkové ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d = \\ &= 576,27 + 4653,99 + 715,47 + 21,6 + 90 = 6057,33 W \end{aligned} \quad (4.194)$$

Účinnost

$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{P_i}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{6057,33}{21077,28}\right) = 71,26\% \quad (4.195)$$

4.4 Momentová charakteristika

Jmenovitý skluz

$$s_n = R'_2 \cdot \frac{I_{1n}}{U_1} = 1,6 \cdot \frac{19,7}{1140} = 0,028 \quad (4.196)$$

Jmenovité otáčky

$$n_n = n_s \cdot (1 - s_n) = 750 \cdot (1 - 0,028) = 729 \text{ ot/min} \quad (4.197)$$

Jmenovitý moment

$$M_n = \frac{P_2}{\frac{\omega_1}{p} \cdot (1 - s_n)} = \frac{18000}{\frac{2\pi \cdot 50}{4} \cdot (1 - 0,028)} = 235,79 \text{ Nm} \quad (4.198)$$

Maximální moment

$$\begin{aligned} M_{max} &= \frac{3p}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{U_{1N}^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X^2}} = \\ &= \frac{3 \cdot 4}{2 \cdot 2\pi \cdot 50} \cdot \frac{660^2}{(3,99 + \sqrt{3,99^2 + (1,4 + 1,16)^2})} = 947,64 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (4.199)$$

Záběrný proud

$$\begin{aligned} I_z &= \frac{U_{1N}}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2}} = \\ &= \frac{660}{\sqrt{(3,99 + 1,6)^2 + (1,4 + 1,16)^2}} = 107,98 \text{ A} \end{aligned} \quad (4.200)$$

Záběrný moment

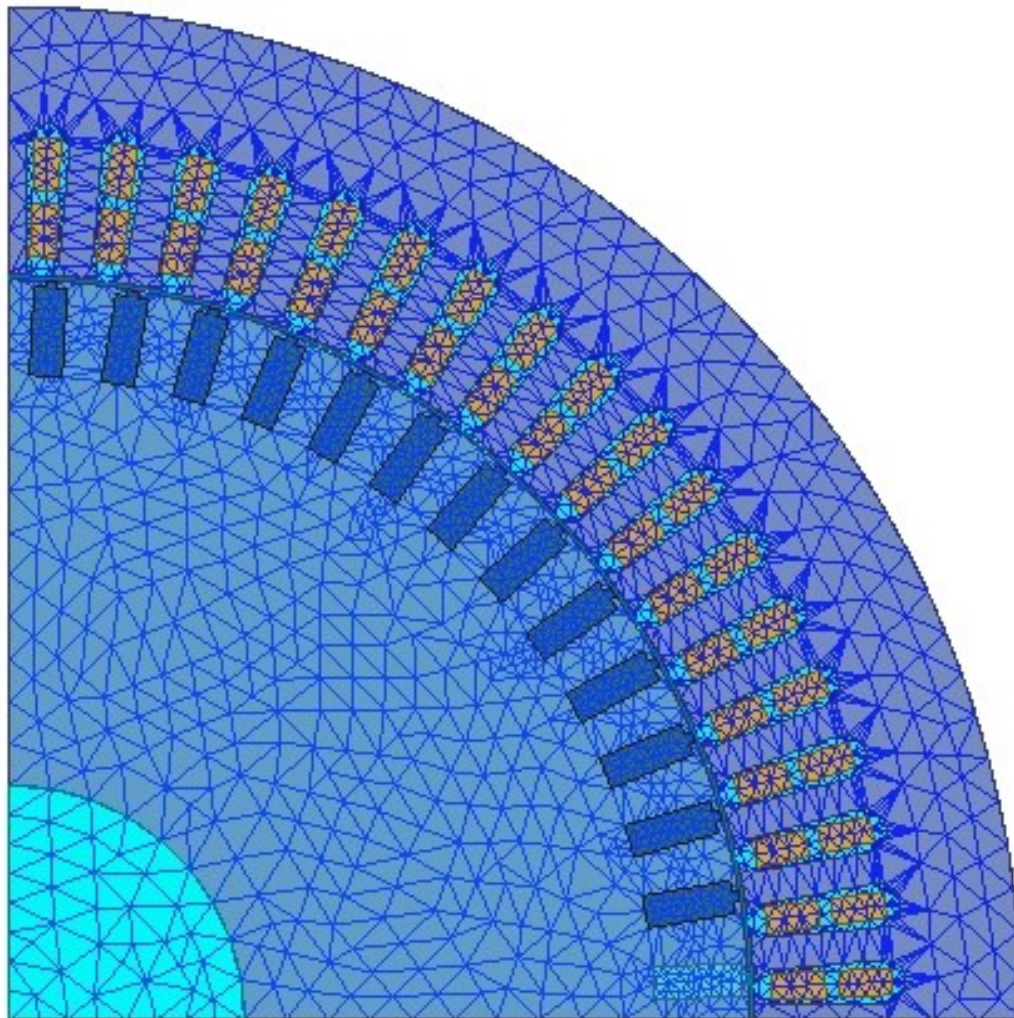
$$M_z = \frac{3 \cdot R'_2 \cdot I_z^2 \cdot p}{\omega} = \frac{3 \cdot 1,6 \cdot 107,98^2 \cdot 4}{2\pi \cdot 50} = 712,59 \text{ Nm} \quad (4.201)$$

Stejnými výpočty bylo postupováno i při výpočtu motoru s $2p = 4$.

5 MKP – metoda konečných prvků

Numerické metody jsou známy již řadu let, ale teprve s rozvojem výpočtové techniky se našlo jejich řádné využití, neboť jsou časově velmi náročné na výpočet.

Numerické metody využívají k výpočtům rozložení uceleného celku do určitého počtu konečných prvků, při kterém vzniká síť elementů spojená v bodech, ve kterých se zjišťují výsledné parametry. Rozsah a přesnost výpočtů je dána celkovým počtem vytvořených elementů, kde ale s rostoucím počtem roste také celkový čas výpočtu.

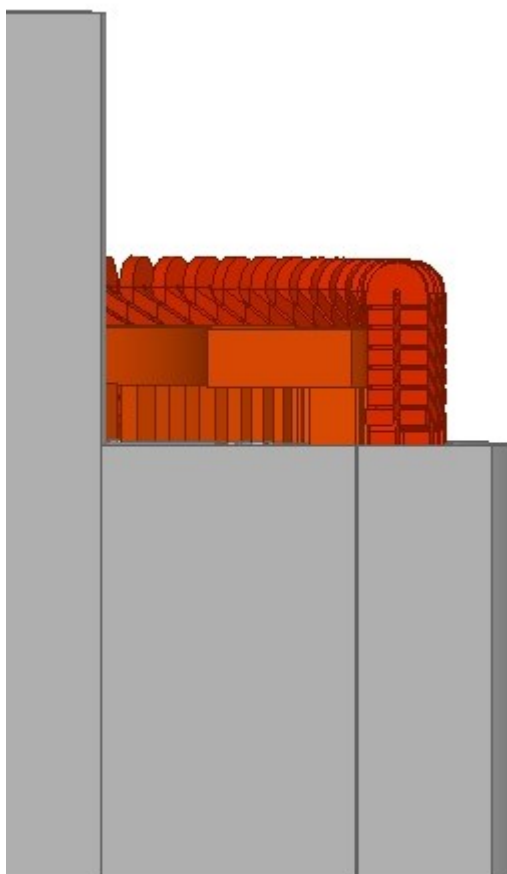


Obrázek 5.1: Síť při rozložení celku do určitého počtu konečných prvků

5.1 Numerický výpočet

Numerický výpočet byl prováděn ve výpočtovém programu ANSYS Maxell.

Pomocí software ANSYS Maxwell byl nadefinován model motoru. Poté byl proveden jeho analytický výpočet a následně i výpočet metodou konečných prvků, pomocí které bylo vykresleno rozložení magnetické indukce v rotorovém i statorovém plechu a také byly vykresleny záběrné proudy a momentové charakteristiky.



Obrázek 5.2: Řez 3D modelem motoru

Do programu byly nadefinovány známé parametry motoru podle tabulky 4.1, 4.2 a 4.4 a další:

Coil Pitch: 13

Number of Strands: 1

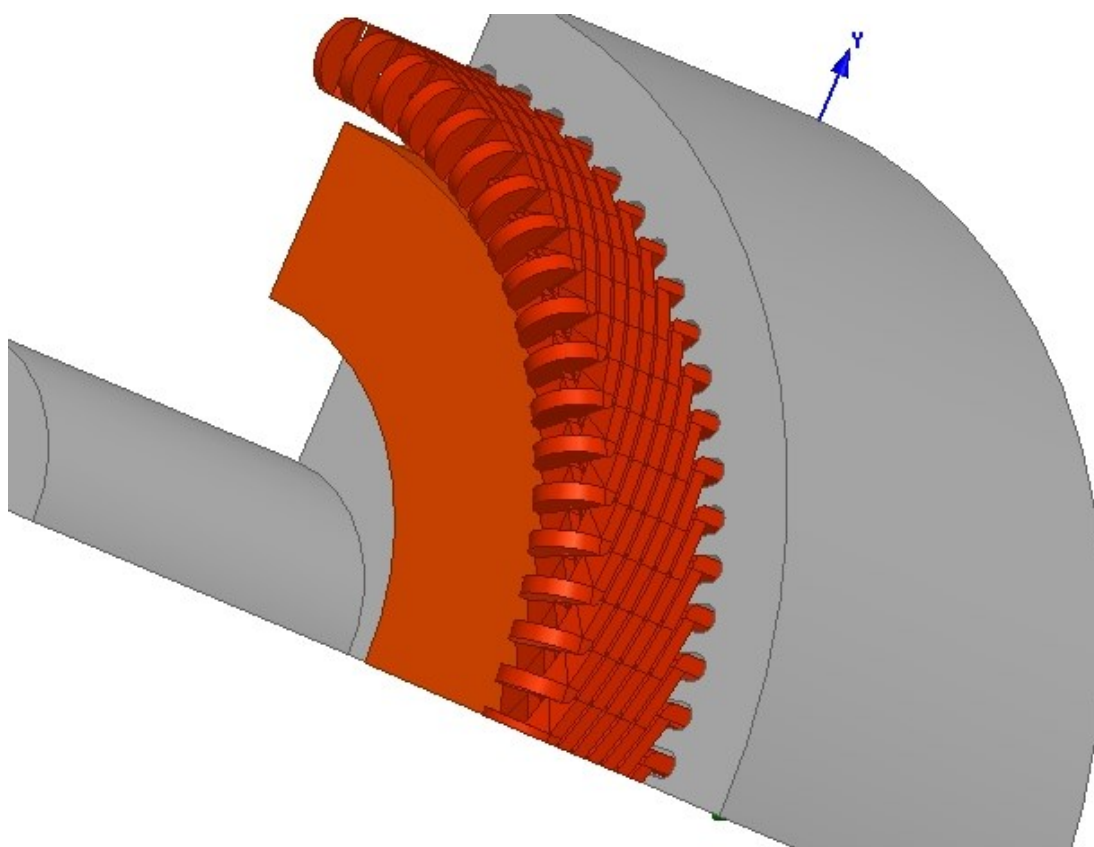
End Extension: 5

End Clearance: 7

Materiál plechů byl vytvořen podle tabulky 4.14.

Tabulka 5.1: Získané hodnoty momentů a proudů numerickou metodou

$2p = 8$			$2p = 4$		
n (ot/min)	M (Nm)	I (A)	n (ot/min)	M (Nm)	I (A)
5	760,1	76,3	5	646	154,3
100	796,9	74,5	150	677	150,4
200	868,2	71,9	300	621,3	147
300	941,8	68,3	450	640,4	141,4
400	1019,3	63,3	600	668,7	134,4
450	1052,1	59,9	750	697,5	125,5
500	1077,8	55,7	900	700,6	114,4
550	1081,3	50,4	1050	693,7	99,4
600	1034,6	43,7	1125	673,7	90,1
650	903,8	35,1	1200	633,4	79,2
730	309,1	18,4	1250	586	71,9
			1325	492,1	58,9
			1445	236,6	31,1



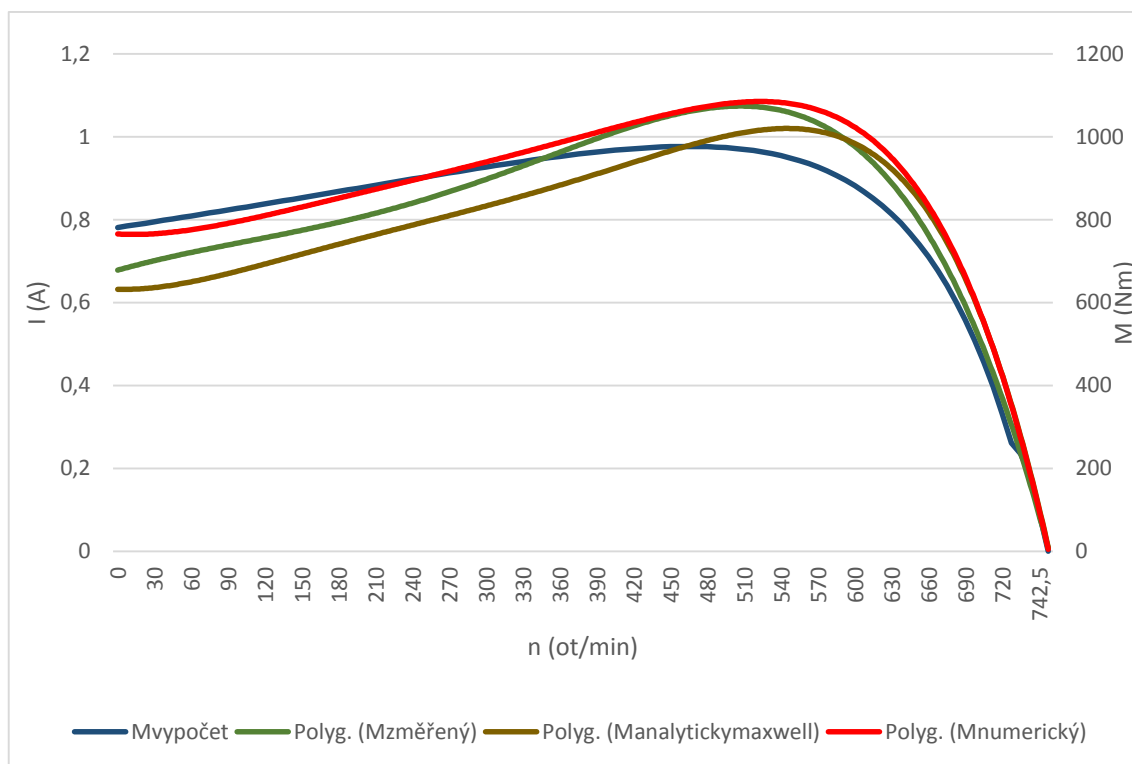
Obrázek 5.3: 3D model motoru

6 Výsledky výpočtů

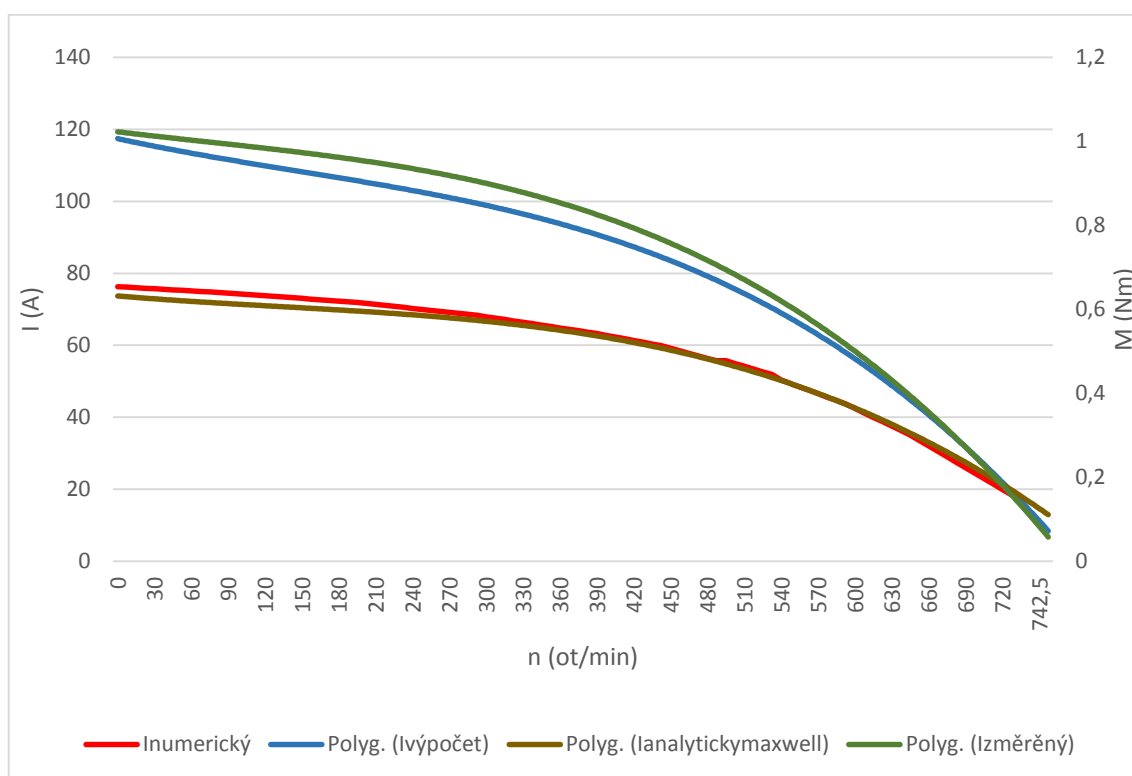
6.1 Zapojení do Δ , $2p = 8$

Tabulka 6.1: *Výsledky z jednotlivých výpočtových metod pro $2p = 8$*

	Analytický výpočet	Analytický výpočet ANSYS Maxwell	Numerický výpočet ANSYS Maxwell	Naměřené hodnoty
Výkon na hřídeli	18 000 W	18000 W	18000 W	18000 W
Jmenovitý proud	19,71 A	15,6 A	18,4 A	19,8 A
Ztráty ve vinutí statoru	4653,99 W	5866,13 W	—	—
Ztráty v kleci rotoru	715,47	399 W	—	—
Ztráty v železe	576,27	776,15 W	—	—
Celkové ztráty	6057,33	7566,28 W	—	—
Účinnost	71,26%	70,4%	—	85,4%
Indukce v zubu statoru	1,63 T	1,86 T	1,82 T	—
Indukce ve jhu statoru	1,35 T	1,52 T	1,32 T	—
Indukce v zubu rotoru	1,64 T	1,77 T	1,65 T	—
Indukce ve jhu rotoru	0,38 T	0,3 T	0,66 T	—
Indukce ve vzduchové mezeře	0,81 T	0,85 T	0,83 T	—
Jmenovitý moment	235,79 Nm	234,18 Nm	309,1 Nm	237 Nm
Maximální moment	947,64 Nm	1034 Nm	1081,3 Nm	1090 Nm
Záběrný moment	712,59 Nm	620 Nm	760,1 Nm	659 Nm



Obrázek 6.1: Momentová charakteristika vyjádřená různými metodami výpočtů pro $2p = 8$

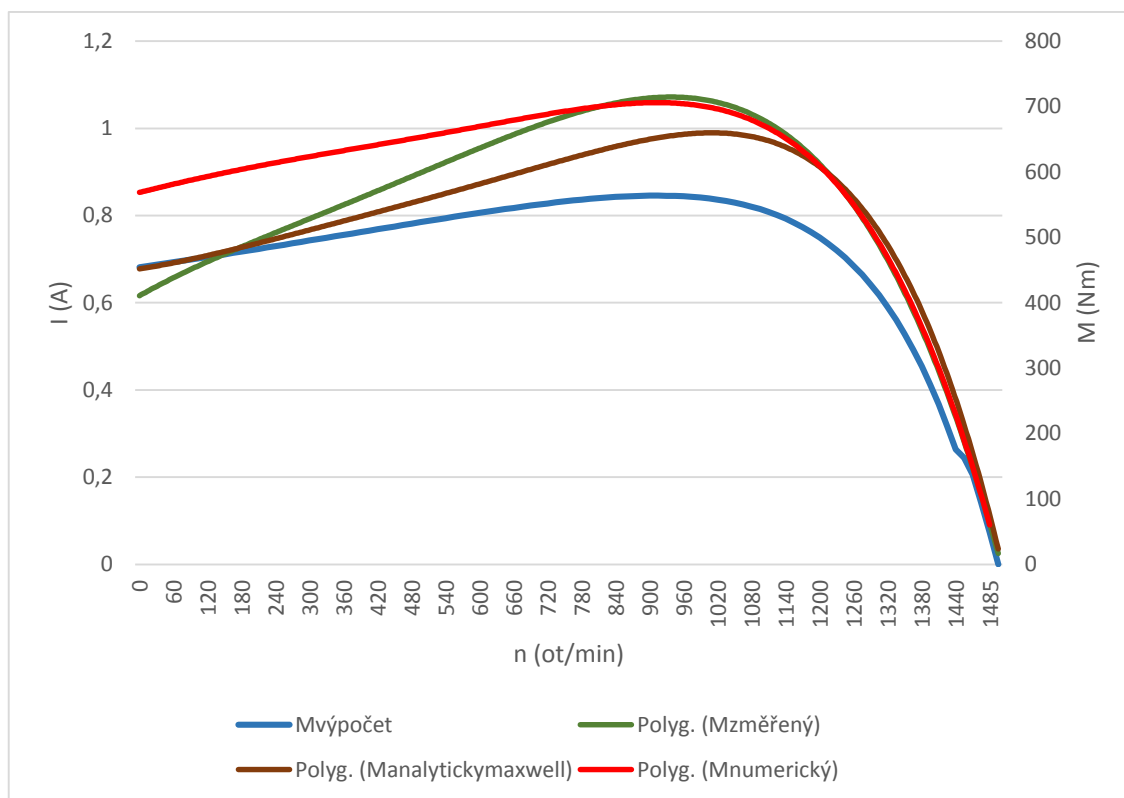


Obrázek 6.2: Rozběhový proud vyjádřený různými metodami výpočtů pro $2p = 8$

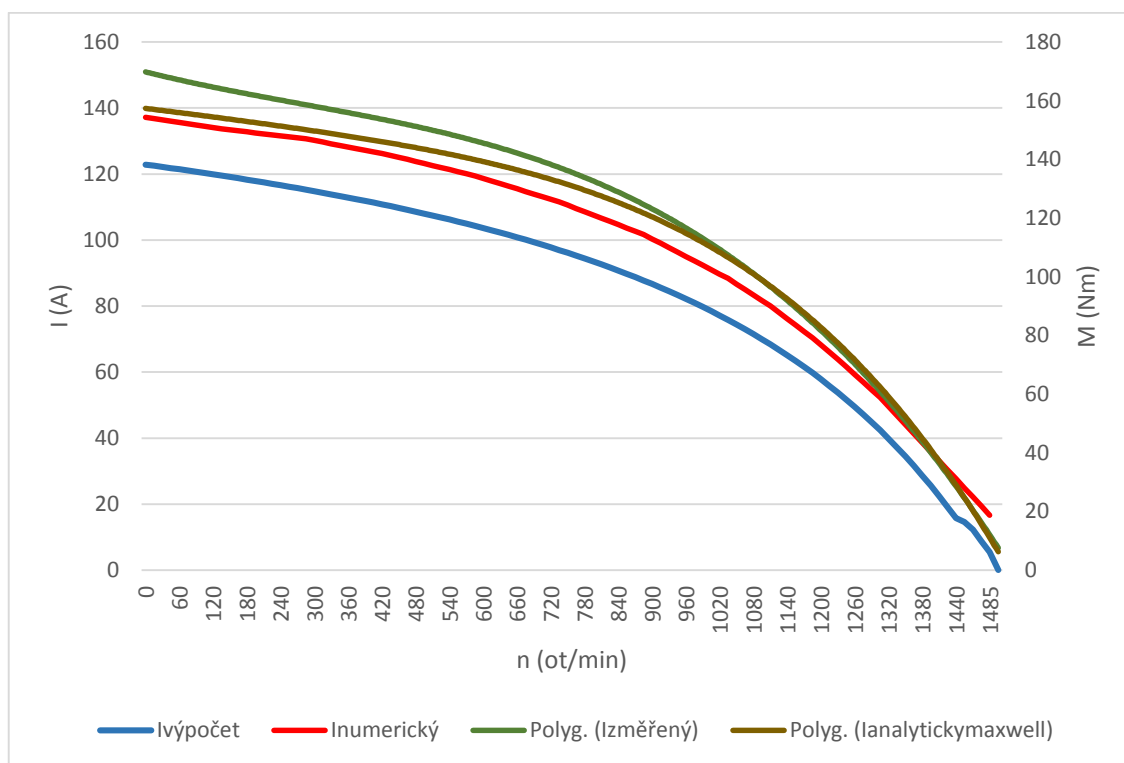
6.2 Zapojení do YY, $2p = 4$

Tabulka 6.2 *Výsledky z jednotlivých výpočtových metod pro $2p = 4$*

	Analytický výpočet	Analytický výpočet ANSYS Maxwell	Numerický výpočet ANSYS Maxwell	Naměřené hodnoty
Výkon na hřídeli	36 000 W	35997,8 W	36000 W	36000 W
Jmenovitý proud	22 A	22,3 A	18,4 A	22,9 A
Ztráty ve vinutí statoru	4387,1 W	3008,1 W	—	—
Ztráty v kleci rotoru	888,6 W	1640,65 W	—	—
Ztráty v železe	390,1 W	534 W	—	—
Celkové ztráty	6465,1 W	6203,1 W	—	—
Účinnost	84,2%	85,3%	—	87,9%
Indukce v zubu statoru	0,82 T	0,99 T	0,99 T	—
Indukce ve jhu statoru	1,35 T	1,51 T	1,54 T	—
Indukce v zubu rotoru	0,82 T	0,95 T	0,77 T	—
Indukce ve jhu rotoru	0,38 T	0,3 T	0,044 T	—
Indukce ve vzduchové mezeře	0,41 T	0,46 T	0,55 T	—
Jmenovitý moment	236,5 Nm	239,4 Nm	236,6 Nm	237 Nm
Maximální moment	560,2 Nm	663,8 Nm	700,29 Nm	711 Nm
Záběrný moment	473,1 Nm	450 Nm	646 Nm	425 Nm

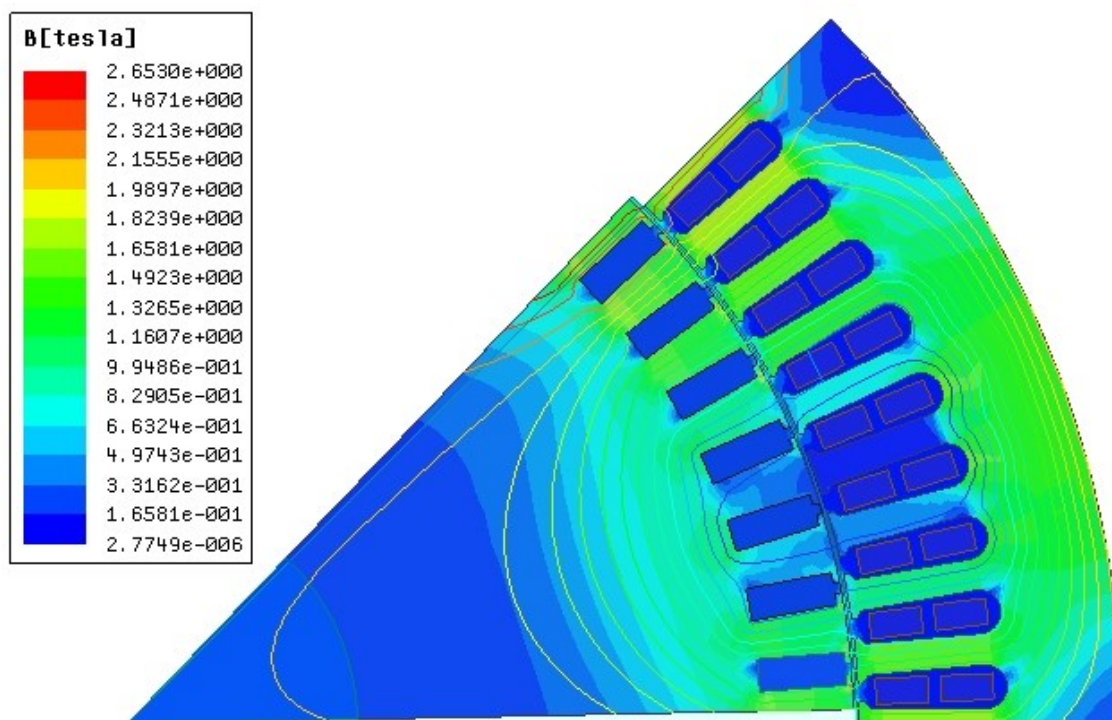


Obrázek 6.3: Momentová charakteristika vyjádřená různými metodami výpočtů pro $2p = 4$

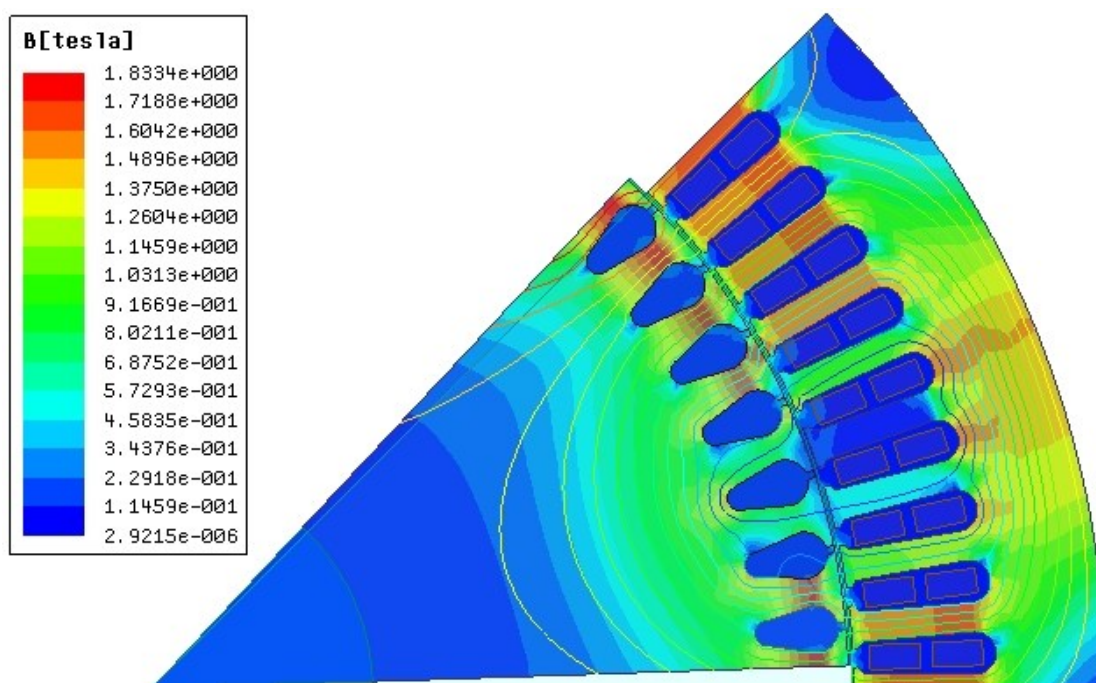


Obrázek 6.4: Rozběhový proud vyjádřený různými metodami výpočtů pro $2p = 4$

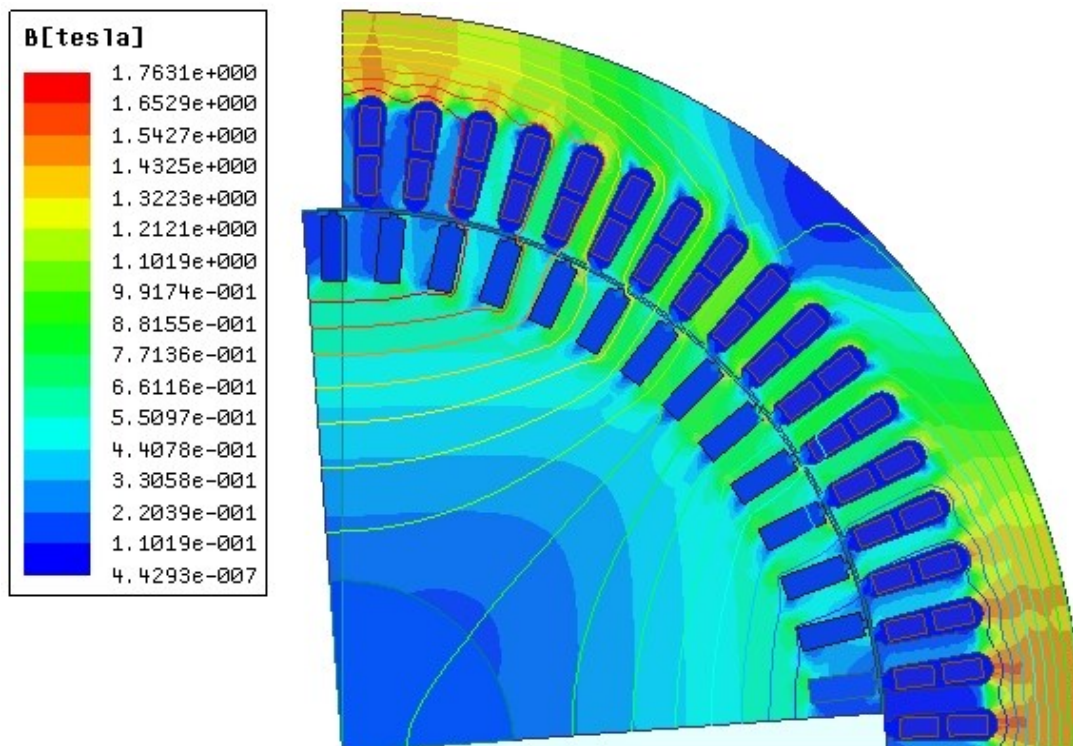
6.3 Rozložení magnetické indukce ve statoru a rotoru



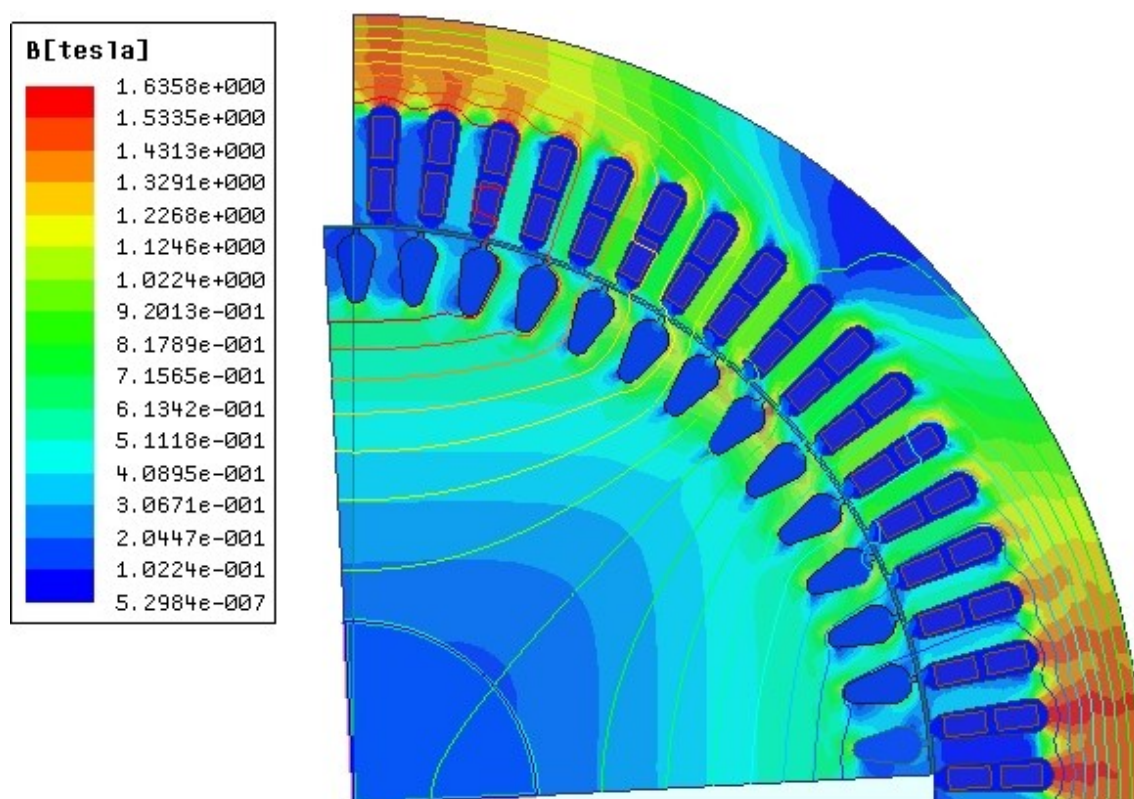
Obrázek 4.5: Rozložení magnetické indukce motoru s montovanou kotvou pro $2p = 8$



Obrázek 4.6: Rozložení magnetické indukce původního motoru s litým rotorovým vinutím pro $2p = 8$



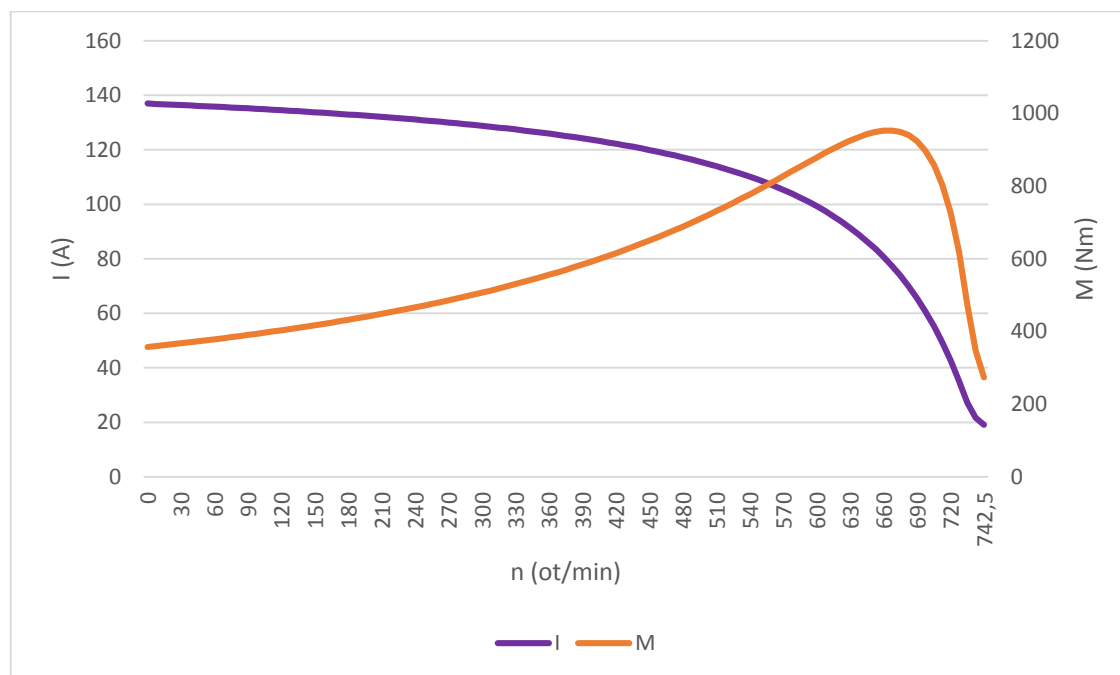
Obrázek 4.7: Rozložení magnetické indukce motoru s montovanou kotvou pro $2p = 4$



Obrázek 4.8: Rozložení magnetické indukce původního motoru s litým rotorovým vinutím pro $2p = 4$

6.4 Charakteristiky původního elektromotoru

Zde jsou vykresleny charakteristiky původního elektromotoru s litým rotorovým vinutím. Bylo postupováno podobným analytickým výpočtem jako u nově navrhovaného motoru, kde byl taktéž ověřen původní návrh. Je nutné brát ale v úvahu, že tyto vykreslené charakteristiky jsou pouze orientační, protože neznáme všechny potřebné materiály, ze kterých byl původní motor vyroben.



Obrázek 6.9: Předpokládané charakteristiky původního motoru

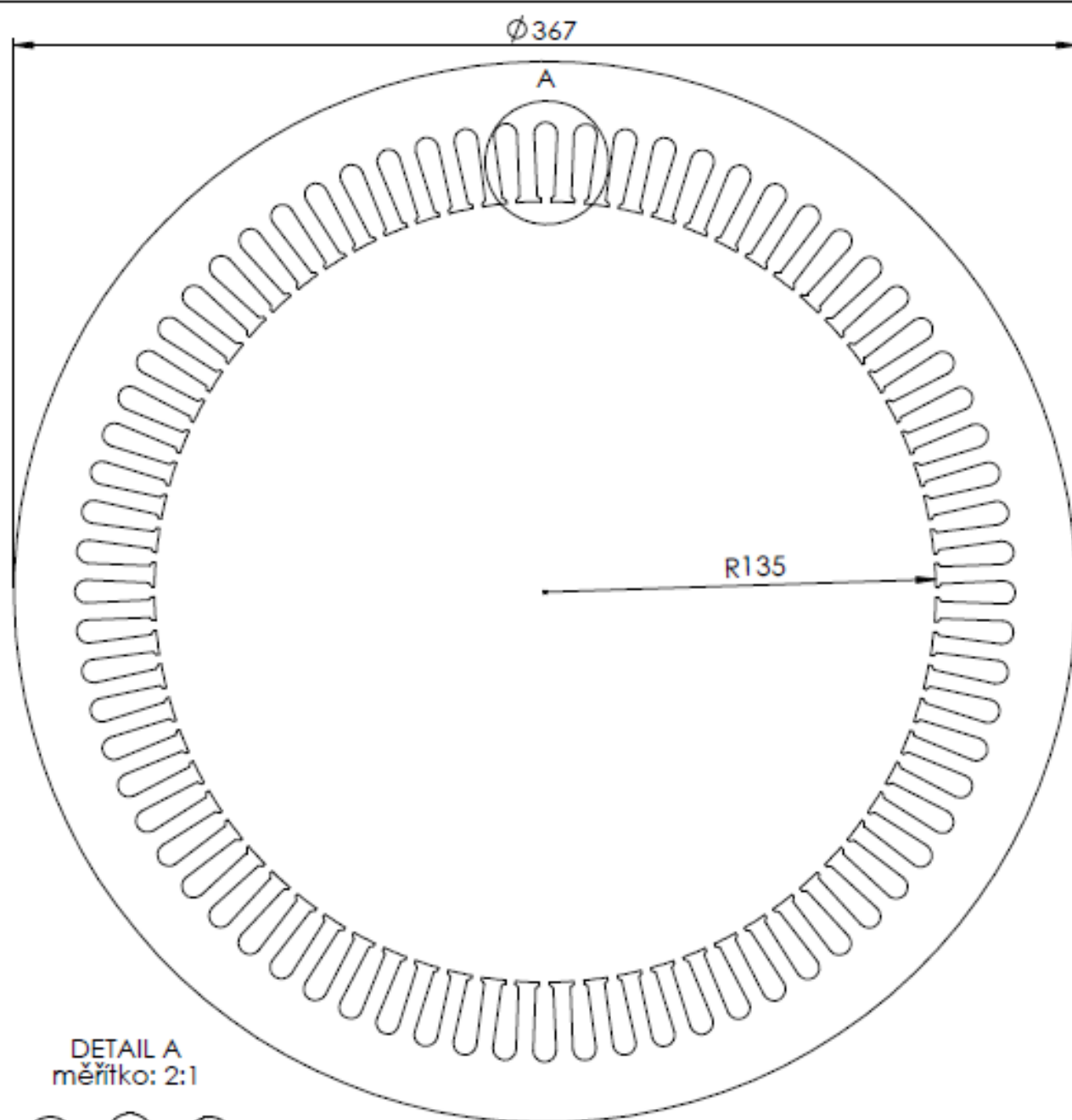
Jmenovitý skluz pro $2p = 8$

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{750 - 740}{750} = 0,0133 \quad (6.1)$$

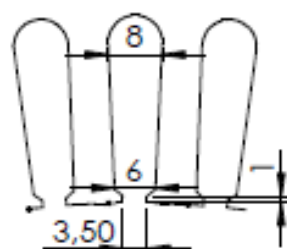
Jmenovitý moment

$$M_n = \frac{P_2}{\frac{\omega_1}{p} \cdot (1 - s_n)} = \frac{18000}{\frac{2\pi \cdot 50}{4} \cdot (1 - 0,0133)} = 232,2 \text{ Nm} \quad (6.2)$$

$$M_n = \frac{P_2}{\frac{\omega_1}{p} \cdot (1 - s_n)}$$

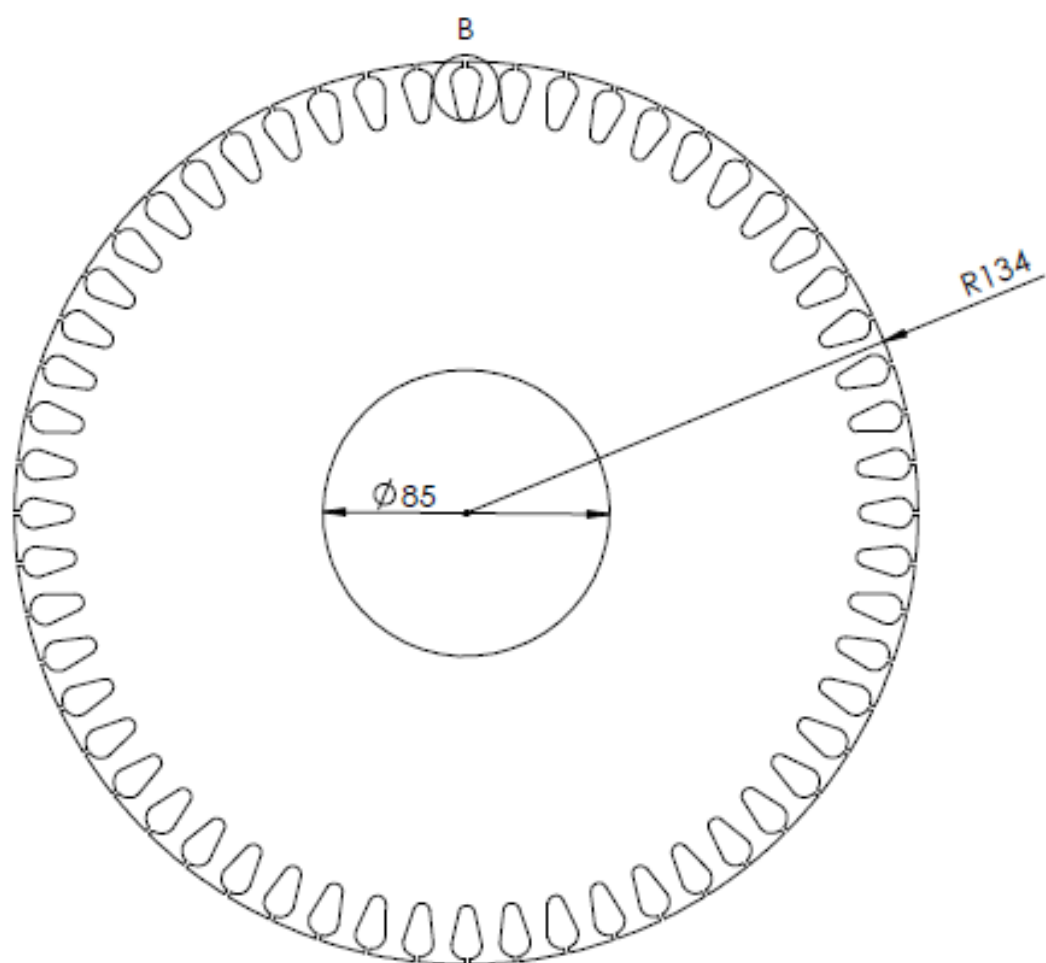


DETAIL A
měřítko: 2:1

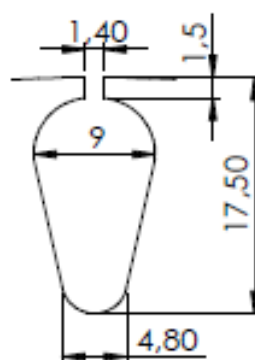


s přesností 0,1 mm

POKUD NEJE UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÉ:		OSTŘANÍ OSTŘÍ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA		
NÁZEV	PODPIS	DATUM				NÁZEV: Stator				
NAVŘEL	Povšak									
PŘEZKOŠIL										
SCHVÁLIL										
VÝROBA										
Z. JAKOSTI					MATERIÁL:	Č. VÝKRESU				A4
					HMOTNOST:	MĚŘÍTKO: 1:2				LST 1 Z 3 LSTŮ

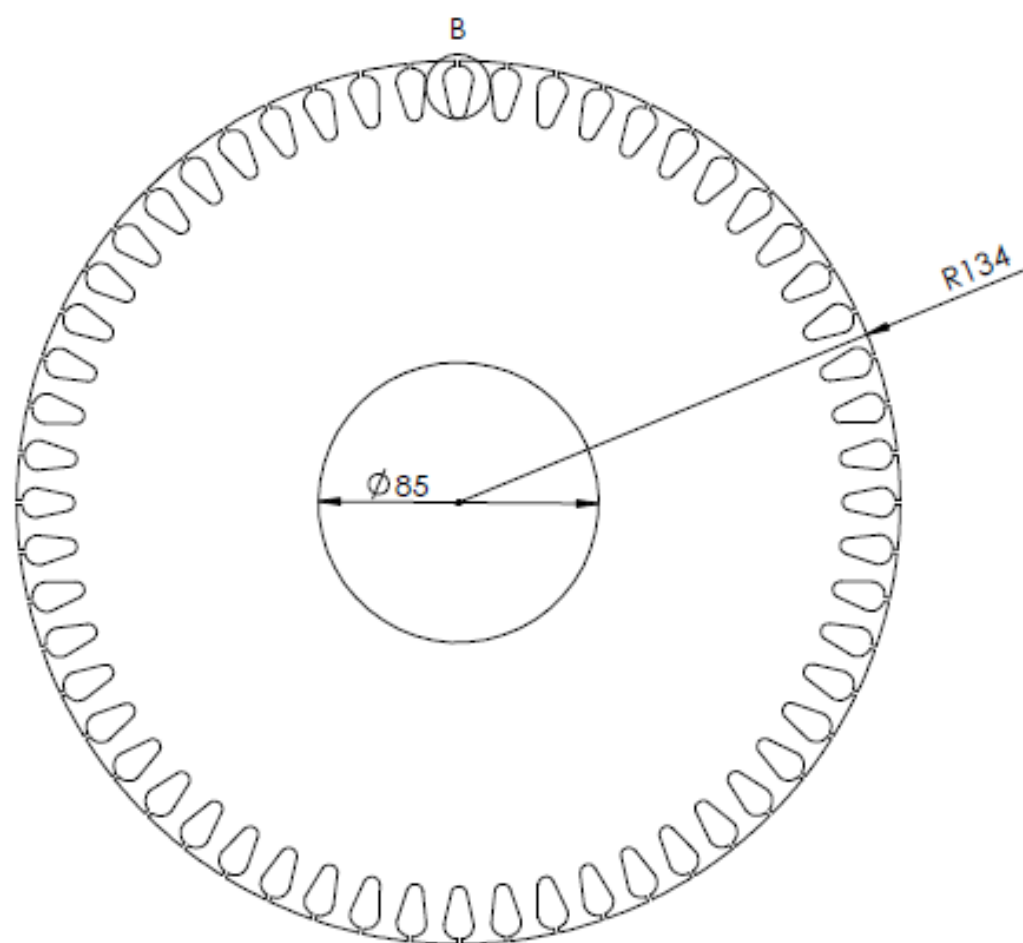


DETAIL B
MĚŘÍTKO 2 : 1

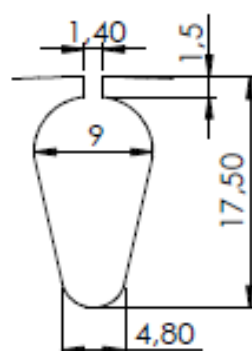


s přesností 0,1 mm

POKUD NEBŮJE UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DĚLNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHELOVÁ:		OPRAVOVÁNÉ:		ODSTRANIT OSTŘÍ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV		PODPIS		DATUM		NÁZEV:		Lité rotorové vinutí	
NÁVĚR		POVĚŘENÍ							
PŘEZKOUŠENÍ									
SCHVÁLENÍ									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU		A4	
				HMOTNOST:		MĚŘÍTKO: 1:2		LIST 2 Z 3 LISTŮ	



DETAIL B
MĚŘITKO 2 : 1

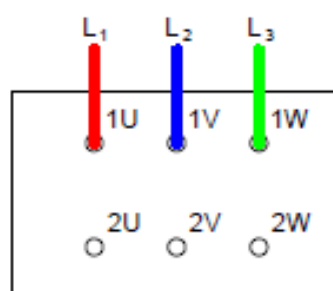
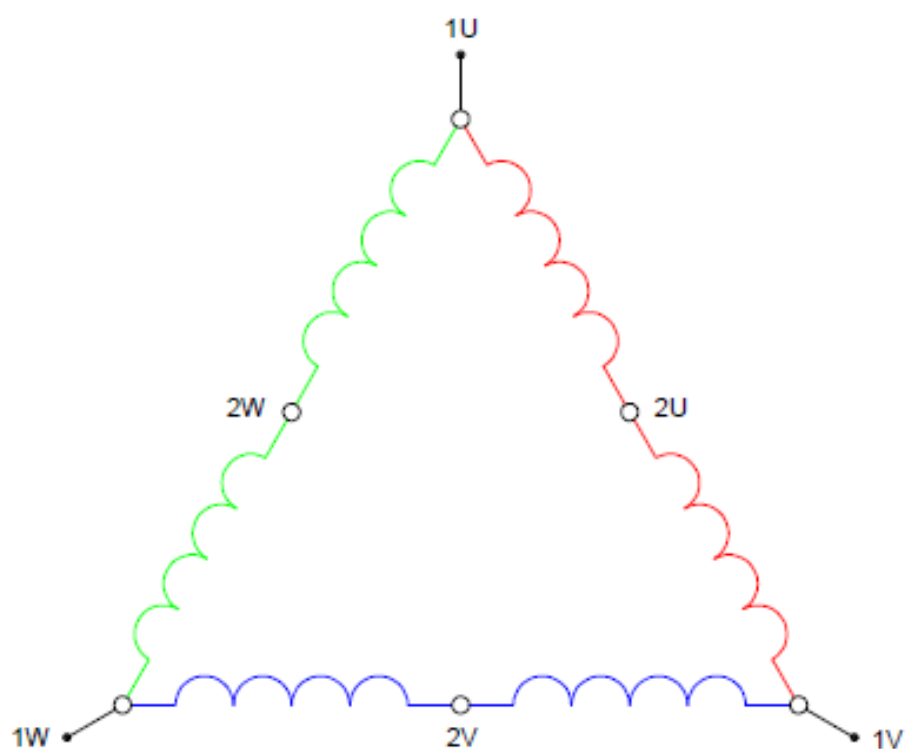


s přesností 0,1 mm

POKUD NEBĚ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHELOVÁ:				OPRACOVÁNÉ:		OSTŘENÍ OSTŘÍ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝŘESU		ZMĚNA	
NÁZEV						NÁZEV:					
POPS						POPS:					
DATUM						DATUM:					
NAVRHL						NAVRHL:					
PŘEZKOUST						PŘEZKOUST:					
SCHVÁL						SCHVÁL:					
VÝROBA						VÝROBA:					
Z. JAKOSTI						Z. JAKOSTI:					
MATERIÁL:						MATERIÁL:					
HMOTNOST:						HMOTNOST:					
MĚŘITKO: 1:2						MĚŘITKO: 1:2					
LIST 2 Z 3 LISTŮ						LIST 2 Z 3 LISTŮ					

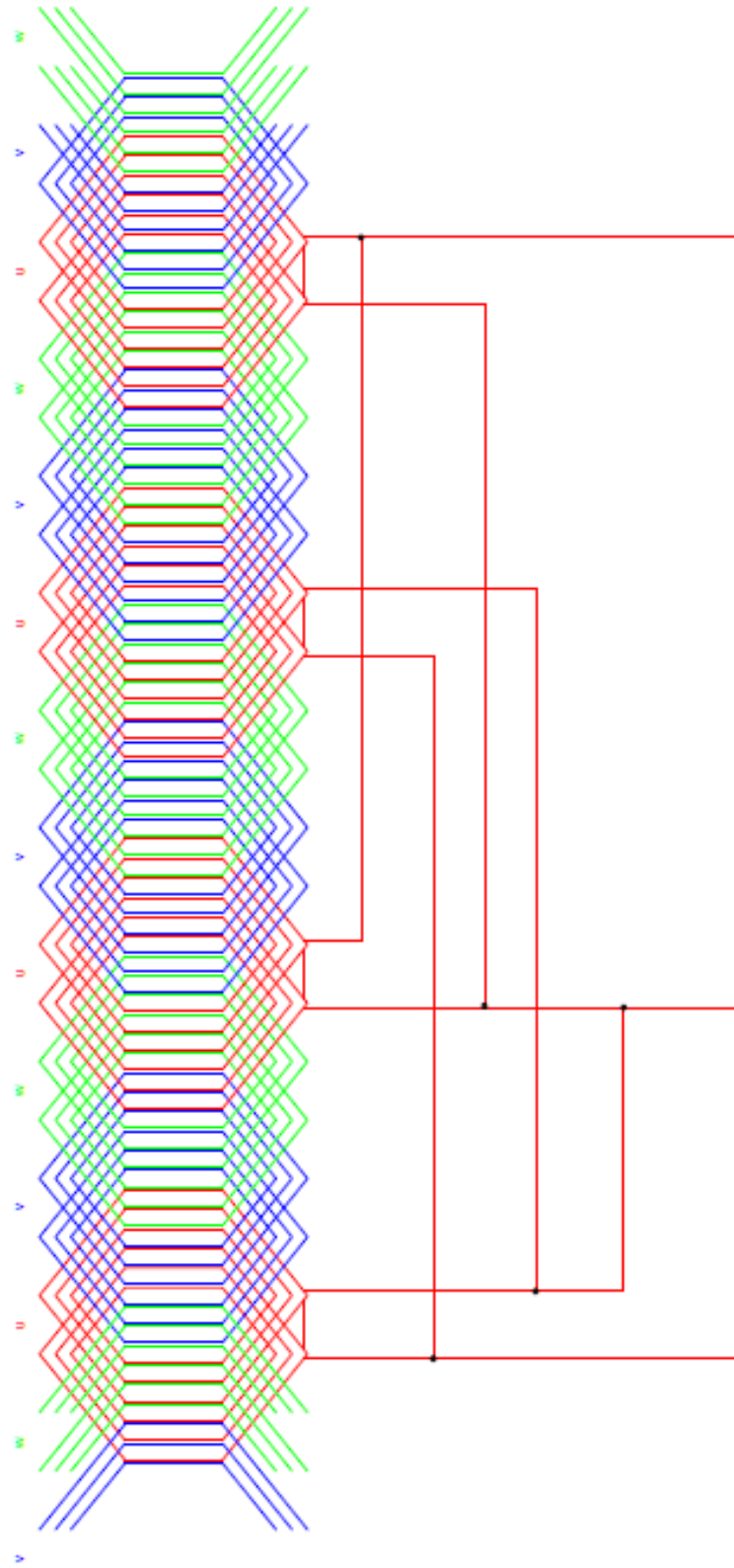
Lité rotorové vinutí

A4

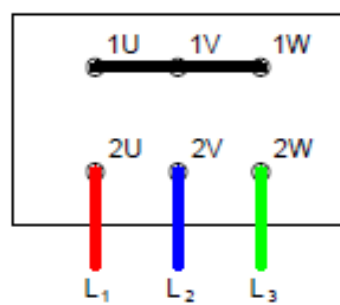
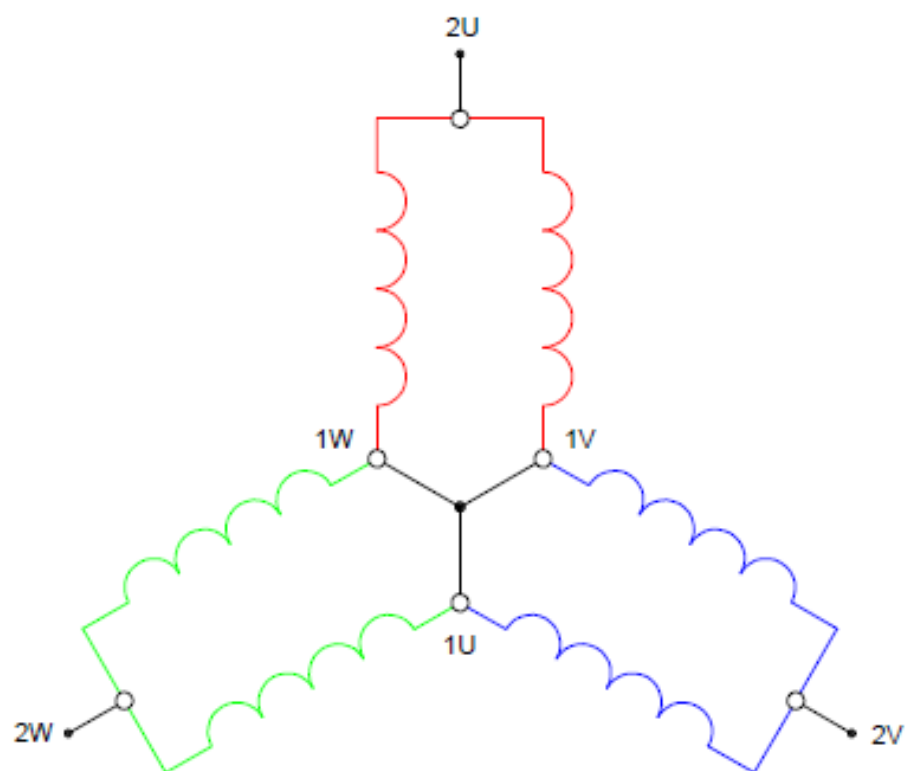


2p=8

VŠB - TU Ostrava		
	Kreslil: Filip Pavlíček	Podpis:
Dahlanderovo zapojení		Datum: 14. 3. 2016
zapojení do Δ		Měřitko: -
		Výkres:

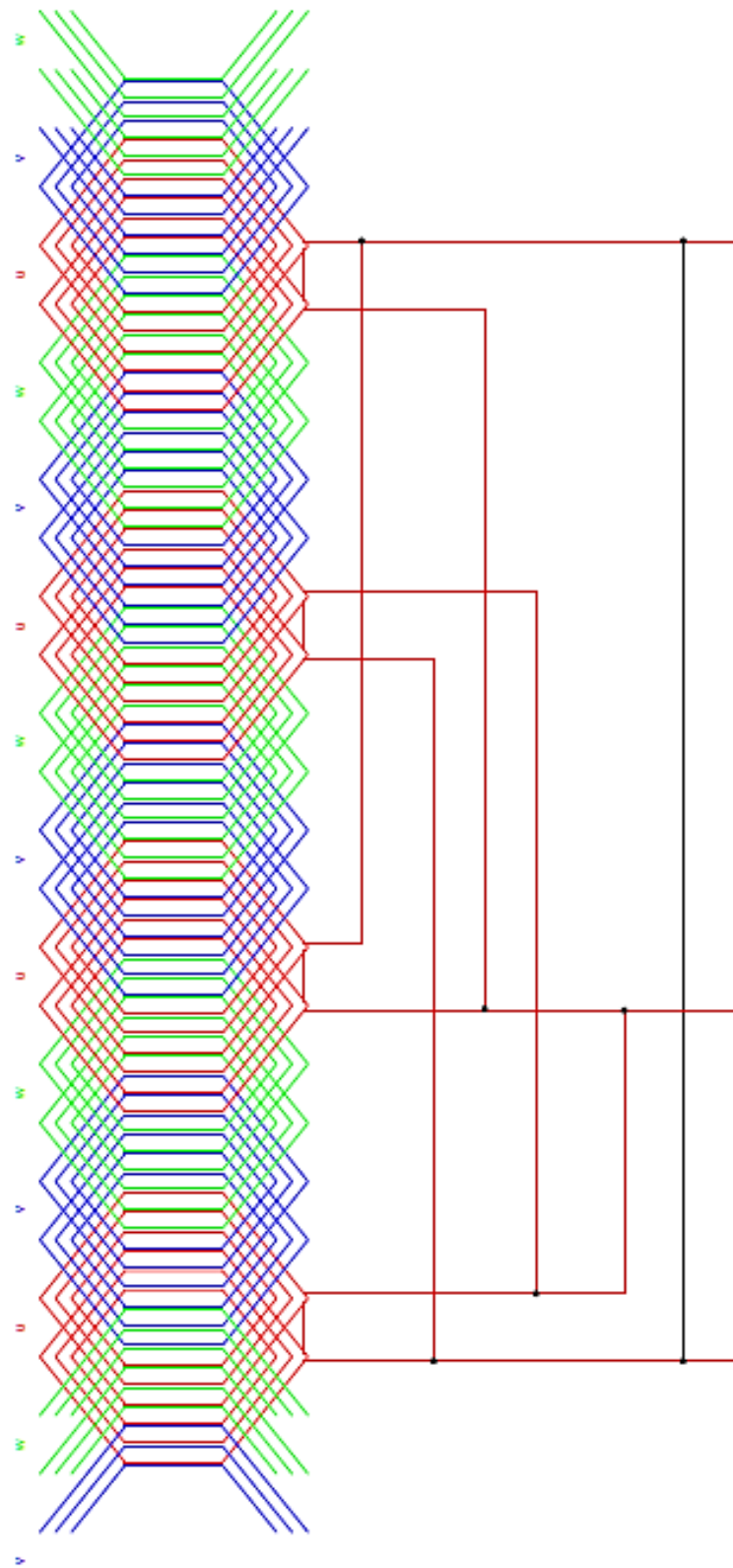


VŠB - TU Ostrava			
	Kreslí: Filip Pavlíček	Podpis:	
Schéma zapojení statorového vinutí			Datum: 14. 3. 2016
			Měřtko: -
			Výkres:
zapojení do Δ			



2p=4

VŠB - TU Ostrava		
	Kreslil: Filip Pavlíček	Podpis:
Dahlanderovo zapojení		Datum: 14. 3. 2016
		Měřítko: -
zapojení do YY		Výkres:



VŠB - TU Ostrava	Kreslil: Filip Pavlíček	Podpis:
Schéma zapojení statorového vinutí		
zapojení do YY		
Datum: 14. 3. 2016		
Měřitel: -		
Vykres:		

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo ověřit návrh nového asynchronního elektromotoru s montovanou kotvou, který nahrazuje původní asynchronní elektromotor s litým rotorovým vinutím. Vyhodnotit, jak se změní parametry nového asynchronního elektromotoru s montovanou kotvou oproti původnímu asynchronnímu elektromotoru s litým rotorovým vinutím.

V praxi při návrhu motoru to bývá tak, že se pro zadané parametry motoru udělá analytický výpočet v software. Podle něj jsou navrženy rozměry motoru, drážek, vinutí. Pomocí numerických metod se tento návrh ověří, případně se upraví. Následně se vyrobí prototyp motoru, který je odzkoušen a změřen. Dalšími numerickými metodami se dále návrh motoru upravuje a doladuje tak, aby se odstranili zjištěné vady motoru, jako například harmonické nebo sedla v momentové charakteristice. Proto i v této Diplomové práci bylo postupováno podobným způsobem. Nejprve byl proveden analytický návrh elektromotoru, který byl poté porovnán s již vyrobeným elektromotorem.

Analytickým výpočtem byl ověřen návrh vyráběného asynchronního motoru s montovanou kotvou nakrátko. Protože se jedná o motor v Dahlanderově zapojení s dělitelným vinutím statoru, kde změnou zapojení statorového vinutí se změní počet pólových dvojic motoru, tím dojde ke změně výkonu a otáček motoru za konstantního jmenovitého momentu, je třeba provést návrh motoru pro oba typy zapojení. Výsledky je třeba mezi sebou srovnat a podle nich navrhnout optimální řešení.

Vykreslené charakteristiky z vypočtené analytické metody byly porovnány s naměřenými charakteristikami motoru (obrázek 6.1, 6.2, 6.3 a 6.4). Vypočtené momentové a rozběhové charakteristiky pro oba typy zapojení se liší od naměřených charakteristik. To je pravděpodobně způsobeno odporem, protože ve výpočtu nebylo počítáno s odporem ve spojích mezi rotorovými tyčemi a kruhy nakrátko. Ve spojích je odlišná elektrická vodivost, než je vodivost mosazi a mědi, protože rotorové tyče s kruhy nakrátko jsou spojovány jiným materiálem s odlišnou elektrickou vodivostí a za vysokých teplot, při kterých dochází k degradaci materiálů a narůstá elektrický odpor. Na příčině se také celkově podílí technologie výroby, protože z technologických hledisek nelze vyrobit zcela homogenní materiály bez jakýchkoliv mechanických vad. Měření také není stoprocentní, protože měřicí přístroje jsou zatíženy chybou, proto je nutno počítat s odchylkami. Kdežto u výpočtů je počítáno s teoretickými hodnotami a s hodnotami odečtenými z vytvořených tabulek a grafů. Další příčinou odlišnosti je také fakt, že výpočet jednoho motoru s Dahlanderovým zapojením byl prováděn jako dva výpočty pro různé motory.

Pro numerický výpočet byl v software ANSYS Maxwell vytvořen 2D model motoru, který byl následně rozložen na síť konečných prvků. Pomocí těchto konečných prvků byl proveden numerický výpočet a z něj vykresleny charakteristiky. Z obrázků 6.1, 6.2, 6.3 a 6.4 lze vidět, že tyto charakteristiky se už více shodují s naměřenými charakteristikami motoru. Nejvíce odlišnými se mohou zdát charakteristiky rozběhových proudů, ale je nutno si uvědomit že se jedná o zapojení do trojúhelníku, tudíž je Maxwellem vykreslen fázový proud na rozdíl od vykresleného změřeného síťového proudu. Zde je nutné podotknout, že numerický výpočet by mohl být ještě přesnější. Protože jsem neznal přesné podrobnosti použitých materiálů, byly zvoleny nadefinované materiály z knihovny. Také, kdyby byl pro výpočet použit 3D model nebo byl model rotoru vykreslen na hustší síť, počítalo by se s více konečnými prvky, s delšími časy pro ustálení přechodných dějů a s vícero vykreslenými body charakteristik. To by už ale bylo časově náročnější na výpočet.

Dále bylo pro názornost vykresleno rozložení magnetické indukce pro nově vyráběný motor, a to jak v režimu zapojení do trojúhelníku, tak i v režimu zapojení do dvojité hvězdy (obrázek 6.5 a 6.7). Také pro porovnání bylo vykresleno rozložení magnetické indukce pro původní motor s litým rotorovým vinutím (obrázek 4.6 a 4.8), bohužel protože nebylo možné zjistit, z jakého materiálu byly původní statorové a rotorové plechy, byl zde použit stejný materiál plechů M470-50A z jakého jsou vyrobeny nové motory. Zde je vidět, že u navrhnuté S drážky původního motoru dochází k lokálnímu přesycování statorových drážek, zatímco u obdélníkové drážky nového motoru je magnetická indukce rozložena rovnoměrněji. Z obrázků 6.5 a 6.7 lze také vidět, že motor v zapojení do trojúhelníku je značně přesycen oproti zapojení do dvojité hvězdy. To je způsobeno změnou počtu pólových dvojic motoru.

V poslední řadě byl stejnou metodou podle předchozího návrhu nového motoru vytvořen pouze předpokládaný průběh charakteristik původního motoru s litým rotorovým vinutím. Tyto charakteristiky jsou pouze informativního směru, protože neznáme všechny potřebné materiály, ze kterých byl původní motor vyroben. I tak lze ale říci, že původní motor s litým rotorovým vinutím dosahoval vyšší účinnosti při rychlejších jmenovitých otáčkách s jen o něco málo menším jmenovitým momentem, než motor s montovanou kotvou. Motor s litým rotorovým vinutím měl také nižší záběrný moment. Naopak motor s montovanou kotvou má vyšší záběrný moment a mnohem vyšší momentovou přetížitelnost. To je způsobeno vyšším elektrickým odporem mosazných rotorových tyčí a celkovou vyšší hmotností montované kotvy, která dosahuje většího momentu setrvačnosti.

Literatura

- [1] HRABOVCOVÁ, Valéria, Pavol RAFAJDUS, Marek FRANKO a Peter HUDÁK. *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. 2. Žilina: EDIS - Vydavateľ'stvo Žilinskej univerzity, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2.
- [2] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0025-X.
- [3] CHMELÍK, Karel a Jiří POSPIŠILÍK. *Elektrické stroje v energetice*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, Regionální centrum celoživotního vzdělávání, 2003. ISBN 80-248-0314-3.
- [4] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [5] MARŠÍKOVÁ, Jarmila. Měděné rotory. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. Praha: FCC Public s.r.o., 2005, (05).
- [6] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982.
- [7] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechniku*. 2., dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-867-0613-3.